

**MODELAMIENTO DINÁMICO DE LA TRANSFERENCIA DE MASA EN EL
SECADO INDUSTRIAL DE ARROZ PADDY**

ANDRÉS FELIPE ALDANA RICO

**UNIVERSIDAD DEL NORTE
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS
MAESTRIA EN INGENIERÍA DE PROCESOS
BARRANQUILLA**

2012

**MODELAMIENTO DINÁMICO DE LA TRANSFERENCIA DE MASA EN EL
SECADO INDUSTRIAL DE ARROZ PADDY**

ANDRÉS FELIPE ALDANA RICO

**Trabajo de Grado para optar al título de Magister en Ingeniería de Procesos
Industriales**

Director

MARCO ENRIQUE SANJUÁN MEJÍA

Ingeniero Mecánico PhD.

UNIVERSIDAD DEL NORTE

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS

MAESTRIA EN INGENIERÍA DE PROCESOS

BARRANQUILLA

2012

Nota de aceptación:
Aprobado por el comité de grado en
Cumplimiento de los requisitos exigidos
Por la Universidad del Norte para
Optar por el título de Magister en
Ingeniería de Procesos

Ing. Arturo González Quiroga M.Sc.

Jurado o Docente o Director

Ing. Ricardo Vásquez Ph.D.

Jurado o Docente o Director

Barranquilla, 17 de Julio de 2013

Para Lucía, María Lucía y Gabriela, ustedes son la razón de mi lógica y la lógica de mis razones, discúlpennme por todas las horas de aislamiento, esto no hubiese sido posible sin ustedes.

AGRADECIMIENTOS

Quisiera tomar este espacio para agradecerle a todos los que hicieron posible esto, en especial tres personas muy importantes, mi esposa Lucía López y mis hijas María Lucía y Gabriela, sin su apoyo y comprensión nada de esto hubiese sido posible, también un agradecimiento muy grande al Ing. Marco E. Sanjuán por confiar en mis ideas, por darme su dirección en este proyecto; gracias por sus consejos y por las clases gratis de MATLAB y por brindarme sus conocimientos en control de procesos, al Ing. Antonio Bula, muchas gracias por las ideas brillantes en el momento justo; a toda la gente que me apoyo en la Universidad del Norte, desde que empecé este postgrado, a mis compañeros de estudios, muchas gracias por explicarme y apoyarme cuando los necesite. En SuperBrix Internacional quiero agradecerle a todo el mundo en especial al Ing. Ricardo Ghisays, al Ing Eliseo Ortega, al Dr. Mariano Ghisays y al Dr. David Ghisays, gracias por las oportunidades, gracias por que cada arranque de planta me permite aprender muchas más cosas y sin ese conocimiento que ustedes y la Organización SuperBrix me han dado y permitido explotar nada de esto hubiese sido realidad. A mis padres Virgilio y Myriam muchas gracias, esto es para ustedes también y por ultimo a la Universidad del Tolima y todo el grupo de profesores y alumnos del programa de Ingeniería Agroindustrial, sin lo que me enseñaron en el pregrado no hubiese podido llevar a cabo esto.

CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	13
INTRODUCCION	14
CAPÍTULO 1. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA DEL PROYECTO	15
1.1 OBJETIVO GENERAL	15
1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	15
1.3 METODOLOGÍA APLICADA.....	15
1.3.1 Resultados esperados.....	16
1.3.2 Planeación del Proyecto	17
CAPÍTULO 2. MARCO CONCEPTUAL Y ESTADO DEL ARTE.....	18
2.1 MARCO CONCEPTUAL.....	18
2.1.1 El Secado de Arroz Paddy	18
2.1.2 Control del Proceso de Secado	19
2.1.3 Alcance de un Sistema de Control de Secado	19
2.1.4 Características Básicas de un Sistema de Control de Secado.....	20
2.1.5 La Conjunción de las Variables de Secado	21
2.1.5 Mecanismos de Control de Secado.....	21
2.2 ESTADO DEL ARTE Y LA TÉCNICA	26
2.2.1 Estado del Arte.....	26
2.2.2 Estado de la Técnica	31
CAPÍTULO 3. MODELAMIENTO DEL PROCESO.....	36
3.1 MODELAMIENTO DE LA OPERACIÓN DE SECADO	36
3.1.1 Balance de masa por el lado del producto	36
3.1.2 Balance de Masa por el Lado del Aire.....	37

3.1.3 Tasa de Secado.....	37
3.1.4 Densidad del Producto	38
3.1.5 Razón de Merma de Humedad	39
CAPÍTULO 4. SIMULACIÓN DEL PROCESO Y DISEÑO DE LA ESTRATEGIA DE CONTROL.....	59
4.1 SIMULACIÓN DINÁMICA DEL PROCESO DE SECADO EN RECIRCULACIÓN DE ARROZ PADDY	59
4.1.1 Simulación para condiciones ambientales típicas en un proceso a temperatura constante	59
4.1.2 Simulación para condiciones ambientales variables en un proceso a temperatura constante	61
4.1.3 Simulación para condiciones ambientales variables en un proceso a temperatura variable.....	63
4.1.4 Trayectoria Óptima de Secado	65
4.2 DISEÑO DE LA ESTRATEGIA DE CONTROL	65
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	66
5.1 CONCLUSIONES	66
5.2 RECOMENDACIONES	67
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Resultados Relacionados con la generación de conocimiento y/o nuevos desarrollos tecnológicos.....	12
Tabla 2. Resultados conducentes al fortalecimiento de la Capacidad Científica Nacional.....	12
Tabla 3. Resultados dirigidos a la apropiación social del conocimiento.....	12
Tabla 4. Características básicas de cosecha de arroz en países tropicales.	14
Tabla 5. Variables que impactan el proceso de secado.....	17
Tabla 6. Modelos Experimentales de Determinación de la Difusividad en el Secado de Arroz y sus Subproductos.....	25
Tabla 7. Modelos Experimentales de Secado de Paddy en Laboratorio.....	26
Tabla 8. Resultados Experimentales Usando el Modelo de Cálculo de Difusividad por Adsorción de Lu y Siebenmorgen para la Variedad Lemont.....	37
Tabla 9. Resultados Experimentales Usando el Modelo de Cálculo de Difusividad por Adsorción de Lu y Siebenmorgen para la Variedad Newbonnet.....	39
Tabla 10. Modelos de Regresión Obtenidos.....	41
Tabla 11. Estadígrafos Asociados a cada una de las Ecuaciones Experimentales.....	42
Tabla 12. Estadígrafos de la Regresión para el Modelo 14.....	43
Tabla 13. Análisis de Varianza de la Regresión del Modelo 14.....	44
Tabla 14. Prueba t para los Componentes de la Regresión del Modelo 14...	44
Tabla 15. Estadígrafos de la Regresión para el Modelo 13.....	44
Tabla 16. Análisis de Varianza de la Regresión del Modelo 13.....	45

Tabla 17. Prueba t para los Componentes de la Regresión del Modelo 13....	45
Tabla 18. Datos de Campo de Secado con la Secadora ST-40AX en la zona de Rupununi en Guyana – Junio de 2013.....	50
Tabla 19. Escenarios de Simulación a Temperatura Constante y Condiciones de Típicas de Funcionamiento.....	56
Tabla 20. Curvas de Secado Predichas con el Sistema Modelado.....	56
Tabla 21. Curvas de Velocidad de Secado Predichas con el Sistema Modelado.....	56
Tabla 22. Componentes de la ecuación experimental con el sistema modelado.....	57
Tabla 23. Condiciones Ambientales Propuestas para el Caso Estudio del Apartado 4.1.2.....	57
Tabla 24. Curvas de Secado Predichas con el Sistema Modelado y Cambios en las Condiciones Ambientales.....	58
Tabla 25. Curvas de Velocidad de Secado Predichas con el Sistema Modelado y Cambios en las Condiciones Ambientales.....	58
Tabla 26. Componentes de la ecuación experimental con el sistema modelado y Cambios en las Condiciones Ambientales.....	58
Tabla 27. Escenarios de Simulación a Temperatura y Condiciones Ambientales Variables.....	59
Tabla 28. Curvas de Secado Predichas con el Sistema Modelado con Cambios en las Condiciones Ambientales y en la Temperatura del Proceso.....	59
Tabla 29. Curvas de Velocidad de Secado Predichas con el Sistema Modelado con Cambios en las Condiciones Ambientales y en la Temperatura del Proceso.....	60
Tabla 30. Componentes de la ecuación experimental con el sistema modelado, Cambios en las Condiciones Ambientales y en la Temperatura de Proceso.....	60

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Cronograma Planteado del Proyecto.....	13
Figura 2. Estrategias de Control de Secado Usadas en el Proceso de Secado.....	18
Figura 3. Estructura de una estrategia de control por retroalimentación.....	19
Figura 4. Estrategia de control de secado feed-forward.....	20
Figura 5. Estrategia de control de secado feed-forward + retroalimentación.....	20
Figura 6. Estrategia de control de secado IBC.....	21
Figura 7. Estrategia de control de secado IMC.....	21
Figura 8. Estrategia de control de secado con microprocesadores.....	22
Figura 9. Distribución Geográfica de los Modelos Propuestos.....	26
Figura 10. Imagen de Pantalla del Sistema AUTOMASEC CLP.....	28
Figura 11. Imagen de Pantalla del Sistema PLC de BUHLER AEROGlide.....	29
Figura 12. Imagen de Pantalla del Sistema VISION de GRAIN SYSTEMS INC.....	30
Figura 13. Imagen de Pantalla del Sistema QUANTUM de BROCK DRYERS.....	31
Figura 14. Distribución Geográfica de los Sistemas Comerciales de Control de Secado Citados.....	31
Figura 15. Proceso de Secado por el Lado del Producto.....	32
Figura 16. Proceso de Secado por el Lado del Aire.....	33
Figura 17. Curvas de Secado para el Lote de Diseño No. 1.....	46
Figura 18. Curvas de Secado para el Lote de Diseño No. 2.....	46
Figura 19. Curvas de Secado para el Lote de Diseño No. 3.....	47

Figura 20. Curvas de Secado para el Lote de Diseño No. 4.....	47
Figura 21. Curvas de Secado para el Lote de Diseño No. 5.....	48
Figura 22. Curvas de Secado para el Lote de Diseño No. 6.....	48
Figura 23. Curvas de Secado para el Lote de Diseño No. 7.....	49
Figura 24. Curvas de Secado para el Lote de Prueba No. 1.....	52
Figura 25. Curvas de Secado para el Lote de Prueba No. 2.....	52
Figura 26. Curvas de Secado para el Lote de Prueba No. 3.....	53
Figura 27. Curvas de Secado para el Lote de Prueba No. 4.....	54
Figura 28. Curvas de Secado para el Lote de Prueba No. 5.....	54
Figura 29. Estrategia de Control Propuesta.....	61

RESUMEN

En este documento se encuentran los resultados de la investigación realizada sobre el desarrollo de una estrategia de control para diferentes escenarios de secado de arroz paddy en batch con variaciones en las condiciones ambientales y de proceso; en este ejercicio se pudo trabajar con datos reales, es decir se trabajó con lotes en escala industrial en la ciudad de Chiclayo, Perú. Con la información de diseño recolectada se realizó un ejercicio de regresión donde se hallaron catorce (14) modelos de los cuales usando técnicas estadísticas se escogieron dos (02). Estos modelos introducen los conceptos ya desarrollados de transferencia de masa en términos del número adimensional de Sherwood. Además de Sherwood, gracias a la investigación se pudo hallar un Número Adimensional que relaciona los gradientes térmicos del proceso; a este número se le denominó N_t y dicho factor resultó una herramienta muy útil en la predicción de la dinámica de la operación de secado en la torre. Una vez se dedujo la ecuación experimental, se procedió a simular el proceso usando MATLAB y SIMULINK para hallar las trayectorias típicas para procesos a temperatura constante, condiciones ambientales constantes y escenarios completamente variables. Una vez cubierta esta sección se procedió a diseñar y proponer la estrategia de control para el proceso.

PALABRAS CLAVE: Arroz Paddy, Secado en Torre, Modelación Dinámica, Estrategias de Control, Modelo de Regresión, Transferencia de Masa

INTRODUCCION

El secado estacionario de arroz paddy es una práctica realizada por los industriales colombianos desde prácticamente el inicio de la industria molinera de este cereal, y se ha posicionado como uno de los métodos que le genera mayor sentimiento de seguridad al operador debido a las bajas temperaturas de trabajo que se llevan a cabo. Esto ha popularizado el concepto de secado estacionario y lo ha vuelto parte fundamental del proceso de transformación del grano al punto en el que dicha práctica que inicialmente era exclusiva de nuestro país ya se ha hecho extensiva a otras latitudes dentro de las cuales se destacan Venezuela y Guyana. La operación de secado ya sea estacionario o dinámico es un gran consumidor de energía ya sea eléctrica para mover los caudales de aire requeridos para el proceso y térmica para acondicionar ese aire hasta el punto en el cual este se encuentre apto para hacer la transferencia de masa y energía que permitan la remoción de humedad del material hasta alcanzar la humedad de almacenamiento requerida.

El secado es una operación compleja donde de acuerdo a las condiciones del grano y del ambiente hacen que cambie la dinámica del proceso, modificando el desempeño y por ende el rendimiento del mismo; esto se ve influenciado por el tipo de secado aplicado; en este documento se analizarán las dos variantes de secado de arroz en torres verticales de múltiples columnas, la primera alternativa es la de hacer un proceso de secado continuo en el cual la exposición al aire caliente es prácticamente constante hasta que se alcanza la humedad objetivo, en la segunda vía de proceso involucra periodos de reposo del producto que tiene como objetivo permitir la realización natural de dos fenómenos en el producto, el primero es la homogenización de la humedad en las diferentes capas del grano y el segundo es la minimización del estrés térmico en el material; ambos fenómenos incrementan la capacidad de secado de una planta industrial y benefician la calidad del grano.

Para realizar el diseño del sistema de control, se debe llevar a cabo una evaluación de las diferentes variables que influyen en el desempeño del proceso, para encontrar cuáles son las interacciones clave y los factores de real incidencia en la velocidad de remoción con el fin de facilitar el desarrollo de la estrategia de control más adecuada para cada escenario.

CAPÍTULO 1. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA DEL PROYECTO

1.1 OBJETIVO GENERAL

- Diseñar e implementar una estrategia de control para el proceso de secado de arroz paddy bajo condiciones variables de demanda térmica y exigencia de remoción

1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Caracterizar las propiedades del grano y de los equipos a utilizar en las diferentes configuraciones
- Diseñar dos escenarios con carga de secado variable y caracterizar su comportamiento dinámico
- Proponer una estrategia de control aplicable a las diferentes variantes de escenarios de trabajo propuestos, mitigando el efecto de las perturbaciones

1.3 METODOLOGÍA APLICADA

La metodología a aplicar consta de las siguientes etapas:

- Levantamiento del estado del arte
- Establecimiento de las configuraciones de proceso a analizar
- Elaboración de balances de masa y energía del proceso en estado estacionario bajo las configuraciones establecidas
- Modelamiento en estado dinámico del proceso bajo las configuraciones establecidas
- Diseño de diferentes estrategias de control para el proceso bajo las configuraciones establecidas
- Validación de los modelos de predicción del comportamiento del proceso para cada configuración establecida
- Retroalimentación y ajuste (De ser requerido)
- Publicación y Socialización de resultados

- Redacción del documento de Tesis

1.3.1 Resultados esperados

Tabla 1. Resultados Relacionados con la generación de conocimiento y/o nuevos desarrollos tecnológicos

Resultado/Producto Esperado	Indicador	Beneficiario
Tecnología de Proceso Desarrollada	Estrategia de Control	Usuario Final, Plantas de Secado de Arroz

Tabla 2. Resultados conducentes al fortalecimiento de la Capacidad Científica Nacional

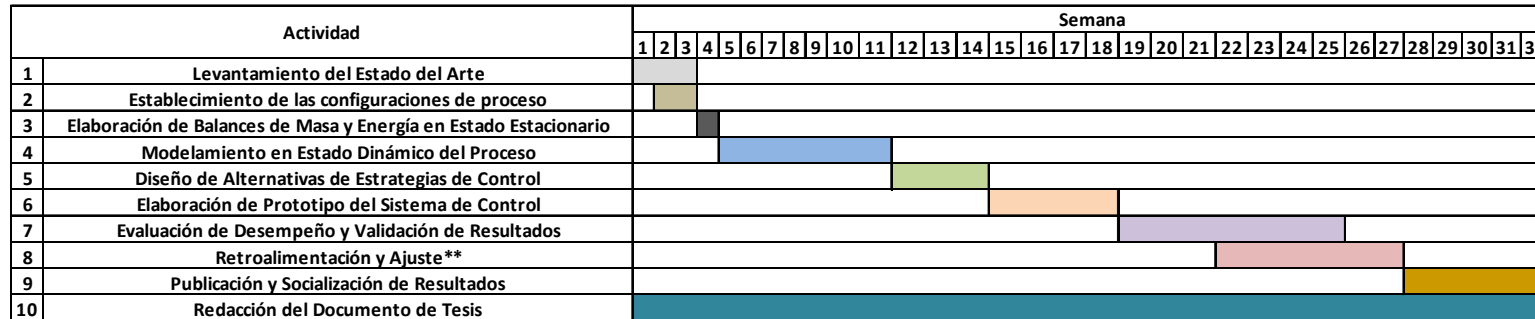
Resultado/Producto Esperado	Indicador	Beneficiario
Personas involucradas en el área de secado de arroz podrán utilizar los resultados de la investigación y plantear temas de estudio a partir de esta	Documento de tesis	Personal interesado en el tema

Tabla 3. Resultados dirigidos a la apropiación social del conocimiento

Resultado/Producto Esperado	Indicador	Beneficiario
Artículo con los resultados más relevantes del proyecto	Artículo en revista con indexación ISI	Comunidad científica
Ponencia en evento científico nacional	Ponencia en memorias	Comunidad científica

1.3.2 Planeación del Proyecto

Figura 1. Cronograma Planteado del Proyecto



Se puede apreciar que el proyecto está planteado para tener una duración de 32 semanas, dentro de las cuales se realizara la investigación.

CAPÍTULO 2. MARCO CONCEPTUAL Y ESTADO DEL ARTE

2.1 MARCO CONCEPTUAL

2.1.1 El Secado de Arroz Paddy

El arroz es uno de los cereales de mayor importancia a nivel mundial, a tal punto que es considerado uno de los pilares de la pirámide de la alimentación humana, lo cual hace que sea muy importante el poder procesarlo de manera segura para garantizar y/o mantener su calidad, lo cual en países tropicales como el nuestro es un completo desafío para la agroindustria molinera, ya que nuestras condiciones ambientales son el caldo de cultivo para el desarrollo de insectos, hongos y demás patógenos que podrían poner en riesgo la seguridad alimentaria de la población consumidora. Para esto se ha desarrollado la operación de secado de grano, la cual tiene como objetivo el de reducir el contenido de humedad hasta un nivel determinado donde se minimiza la tasa de respiración y lo que es más importante, la actividad acuosa, con lo cual los patógenos no pueden proliferar, lo cual prolonga la vida útil del cereal y asegura su mantenimiento para el proceso de molienda que se le aplica.

Para poder tener algunas bases de arranque para las operaciones de secado, primero se deben tener en cuenta las características relevantes de cosecha para la operación, las cuales se presentan a continuación:

Tabla 4. Características básicas de cosecha de arroz en países tropicales

Variable	Valor
Humedad de Cosecha	25.0%
Humedad de Almacenamiento	12.0%
Humedad Relativa Máxima para Secar sin Calentamiento	60.0%
Temperatura de Secado Máxima para Estacionario	43.0°C
Temperatura de Secado Máxima para Torres	55.0°C

2.1.2 Control del Proceso de Secado

En la actualidad la mayoría de operaciones de secado de sólidos cuentan con algún tipo de control de proceso; dichas estrategias pueden variar entre un simple control de temperatura de aire caliente a la entrada o salida de un equipo. El nivel de “manualidad” en las operaciones de control de secado depende de la velocidad y la escala de la operación, a medida que estas características se hacen más grandes, se hace necesario implementar mayores niveles de complejidad en la estrategia de control; Sin embargo la mayoría de equipos de uso industrial y comercial se aplican estrategias bastante básicas de control (Sobre todo retroalimentaciones de temperatura), lo cual es bastante paradójico ya que el proceso de secado es bastante no lineal.

La constante no linealidad del proceso abre la puerta para que se desarrollen nuevos sistemas de control de la operación basados en principios MBC (Model Based Control), Lógica difusa (Fuzzy FLC) o incluso control basado en redes neuronales, que le proporcionen mayores niveles de efectividad de predicción de comportamientos comparados con simples modelos matemáticos.

2.1.3 Alcance de un Sistema de Control de Secado

Para poder establecer un sistema efectivo de control de secado, se debe tener muy claro que el objetivo principal de esta operación es el de obtener un producto sólido de una calidad deseada con el mínimo costo posible y de ser posible alcanzando altas capacidades de trabajo. Debido a la complejidad de este proceso, se debe monitorear una gran cantidad de variables, manteniéndolas en niveles aceptables para la seguridad de la operación y del producto mismo.

Además de lo anterior, otro de los objetivos del sistema de control que reviste de vital importancia es la optimización del consumo energético expresado en términos de uso de potencia eléctrica y combustible por unidad de masa procesada. Por lo tanto y de acuerdo a los nuevos escenarios de globalización de mercados, se hace imperativo acelerar el desarrollo de estrategias de control más avanzadas que optimicen todos los aspectos operativos del proceso de secado.

Dentro del sector de control de procesos, la operación de secado ha sido una de las menos estudiadas, normalmente esto se debe a los siguientes factores:

- Bajos niveles de concientización en la incidencia del secado en la calidad del producto final.
- Falta de mecanismos adecuados para realizar el control de humedad del producto en línea.
- La gran cantidad de no linealidades que trae implícitas la dinámica del proceso de secado.
- Bajo algunas condiciones especiales el proceso de secado puede ser considerado auto-regulable, mientras que se mantengan constantes variables como alimentación, temperatura y caudal de aire entre otras.

Por otra parte se puede decir que los objetivos puntuales de un sistema de control de secado son:

- Mantener una determinada calidad del producto seco sin importar las perturbaciones que se tengan en el proceso ni las variabilidades que traiga implícita la materia prima.
- Maximizar la capacidad de secado con un consumo óptimo de energía al mínimo costo posible.
- Garantizar una remoción precisa de la humedad sin producir secado insuficiente o excesivo.
- Reducir al mínimo posible el riesgo de incendios, productos defectuosos y contaminación del medio ambiente.
- Compensar el proceso de tal forma que se logre la supresión de perturbaciones externas al sistema.

2.1.4 Características Básicas de un Sistema de Control de Secado

Las características básicas de un sistema de control de secado son:

- **Alta Precisión:** La humedad del producto a la salida del sistema debe ser muy cercano al valor objetivo, ya que una variación por fuera de control puede ocasionar problemas serios de calidad en procesos subsiguientes:
- **Estabilidad:** No deben haber oscilaciones en el sistema ya que estas traen consigo grandes desviaciones en la humedad objetivo.
- **Velocidad de Respuesta:** El sistema debe responder rápidamente ante cambios en las condiciones del proceso, esto implica acciones rápidas y precisas de los controladores del sistema.

- **Robustez:** El proceso se realiza bajo un amplio espectro de condiciones no controlables (Sobre todo ambientales), lo cual implica que el sistema de control deberá compensar el efecto que estas puedan tener sobre el desempeño del proceso de secado como tal

2.1.5 La Conjunción de las Variables de Secado

Antes de revisar la aplicación de las diferentes estrategias de control que se usan en procesos de control de secado, se deben establecer las variables que afectan el proceso y los efectos de cada una de ellas (Ver Tabla 1):

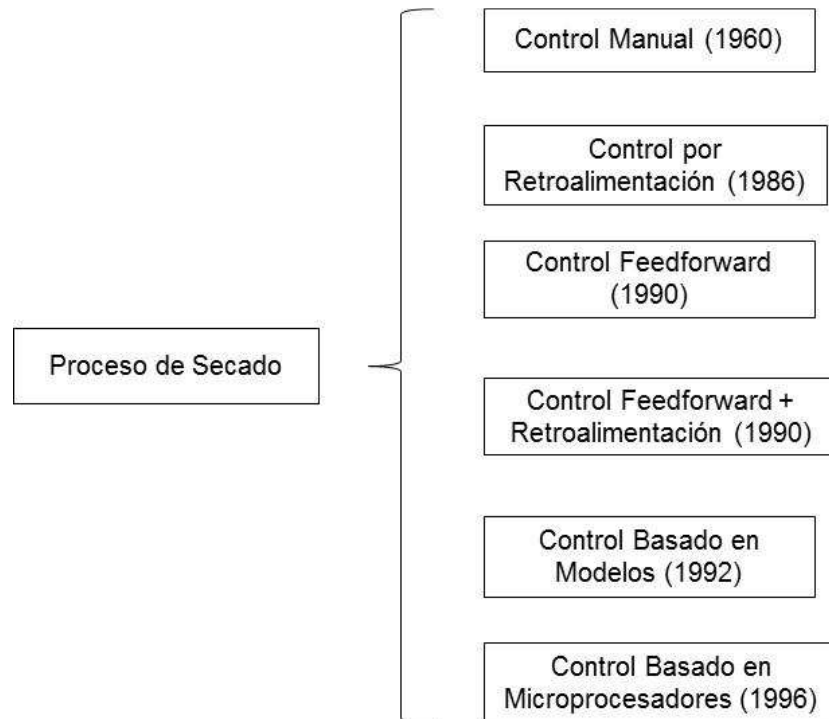
Tabla 5. Variables que impactan el proceso de secado:

Variable	Tipo de Variable
Temperatura del Aire o Gas de Entrada	Manipulable
Velocidad de Carga o Descarga, Tiempo de Retención	Manipulable
Velocidad de Rotación del Ventilador, Regulación de Presiones de Trabajo	Manipulable
Temperatura del Aire Ambiente	No Manipulable
Humedad relativa del ambiente, humedad específica del aire de secado	No Manipulable
Contenido de Humedad del Sólido Alimentado	No Manipulable
Composición del Sólido	No Manipulable
Contenido de Humedad del Sólido "Seco"	Controlada
Temperatura de Salida del Aire	Controlada
Humedad específica del aire de salida	Controlada

2.1.5 Mecanismos de Control de Secado

A través de la historia se han tratado de implementar diferentes tipos de estrategias de control del proceso de secado, las más conocidas son:

Figura 2. Estrategias de Control de Secado Usadas en el Proceso de Secado



2.1.5.1 Control Manual

El concepto de control de proceso de secado nace con la estrategia de control manual. El concepto de control manual implica concientizar a los operadores en la ineficiencia ocasionada por no tener en cuenta las variables de la Tabla 1 en el momento de realizar el proceso. Lo anterior se vio impulsado con el desarrollo de las primeras plantas de secado continuo en 1960. Un sistema de control manual de secado siempre contiene los siguientes pasos:

- Encienda la secadora
- Regule la capacidad
- Mida la humedad de salida del producto y compare contra el objetivo
- Basado en la diferencia encontrada ajuste una de las variables de control (Capacidad, suministro energético, entre otros)

Este sistema es muy simple y de bajo costo, además la operación es significativamente sencilla en comparación con sistemas de alto automatismo,

pero se tienen dificultades en la constancia de los rendimientos de proceso esperados.

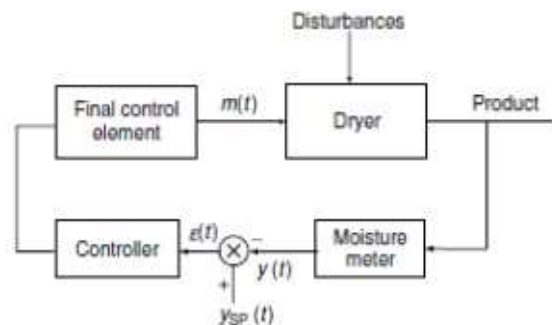
2.1.5.2 Control por retroalimentación

Es uno de los más usados a nivel industrial y se fundamenta en mantener una variable controlada (Normalmente temperatura o humedad) y modifica una de las variables de manipulación. Robinson, Marchant y Whitfield fueron los pioneros en este tipo de control. El control por retroalimentación de una operación de secado de arroz puede incluir acciones PROPORCIONALES, INTEGRALES y DERIVATIVAS, la acción de control en este caso viene dada por [7]:

$$m(t) = K_c \varepsilon(t) + \frac{K_c}{\tau_i} \int \varepsilon(t) dt + K_c \tau_D \frac{d\varepsilon}{dt} + BIAS$$

La estructura general de una estrategia de control por retroalimentación típica contiene la siguiente estructura

Figura 3. Estructura de una estrategia de control por retroalimentación

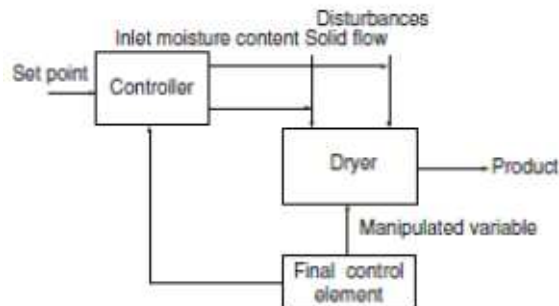


Así como la literatura nos muestra que la recomendación mayor es la de usar como variable controlada a la humedad, debido al costo actual de los sensores, se prefiere controlar la temperatura y correlacionarla con la humedad.

2.1.5.3 Control feed-forward

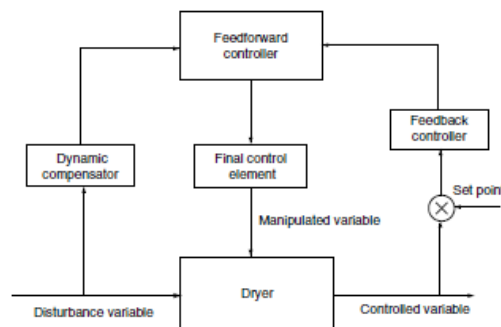
Cuando además de tener en cuenta la humedad o temperatura, se quiere controlar el tiempo de residencia o asociar las perturbaciones a la calidad del producto en una secadora, se puede usar control feed-forward. La estrategia común de este tipo de control se muestra a continuación.

Figura 4. Estrategia de control de secado feed-forward



Una alternativa híbrida es la planteada por Curtois la cual fue combinar controladores por retroalimentación con los feed-forward, tratando de disminuir imprecisiones en el control, a continuación se muestra dicha estrategia

Figura 5. Estrategia de control de secado feed-forward + retroalimentación



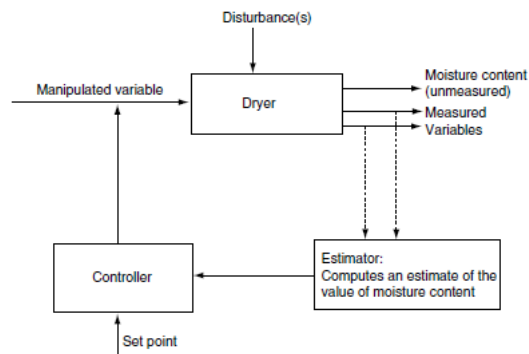
2.1.5.4 Control basado en modelos

El control basado en modelos se puede identificar como una alternativa viable para el proceso de secado debido a que pueden manejar de mejor forma las variables e interrelaciones que el proceso involucra, se pueden tener los siguientes tipos de control basado en modelos

- Inferencial (IBC)
- Interno (IMC)
- Dinámico (DMC)

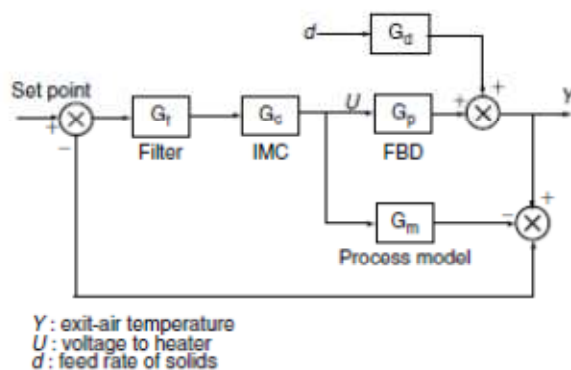
La estrategia **Inferencial** busca calcular el valor de la variable a controlar tomando como base de cálculo otras variables medidas.

Figura 6. Estrategia de control de secado IBC



La estrategia de control interna busca en base a un modelo del proceso calcular un valor de realimentación del cálculo de la variable objetivo junto con las variables de entrada, a continuación se muestra una esquematización de la estrategia de control.

Figura 7. Estrategia de control de secado IMC

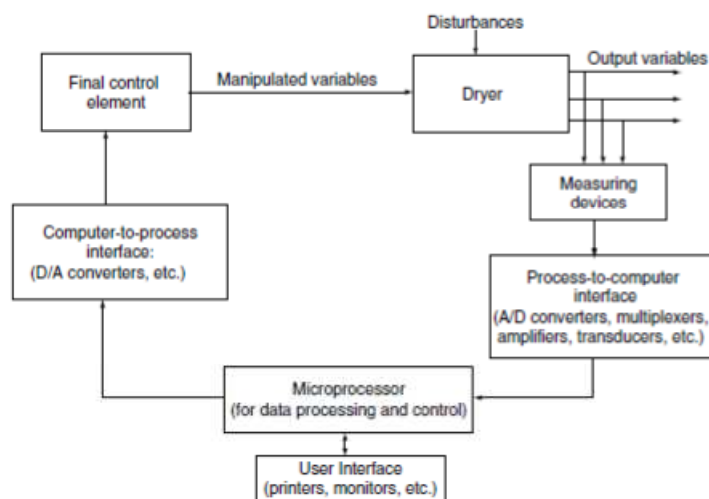


La tercera alternativa es la concerniente al control dinámico del proceso DMC. En este caso se aplica un método de mínimos cuadrados que permite formar un modelo de entradas dinámicas en función de las condiciones del proceso. Es una estrategia muy atractiva para procesos de alto ruido donde se debe aislar y calcular el algoritmo de predicción (GPC) que permita controlar el equipo.

2.1.5.5 Control basado en microprocesadores

A medida que se quiere involucrar una mayor cantidad de señales al control, se han venido desarrollando estrategias de control basadas en la capacidad multitareas que permita establecer lazos correctivos (Retroalimentación) junto con modelos predictivos de orden dinámico, con dispositivos individuales, el sistema sería demasiado complejo, lo cual implica que se deben usar PC's y microprocesadores para distribuir el problema. La estrategia básica se puede apreciar a continuación:

Figura 8. Estrategia de control de secado con microprocesadores



2.2 ESTADO DEL ARTE Y LA TÉCNICA

2.2.1 Estado del Arte

El estado del arte en sistemas de control de secado de arroz paddy puede dividirse en dos campos principales a saber:

- La dinámica del secado de arroz paddy
- El control de la operación de secado

2.2.1.1 La dinámica del secado de arroz paddy

Los fundamentos teóricos básicos que gobiernan las operaciones de secado de arroz paddy se fundamentan la ley de la difusión de Fick (1855) y la ley de conducción de calor de Fourier (1822), fundamentado en estos dos principios Aleksei J. Luikov desarrollo un modelo matemático para la difusión del agua y la incidencia que tiene la transferencia de energía en este proceso (1966); Nueve años después John Crank continuo con el desarrollo de la modelación matemática de la difusión, pero solo fue hasta 1983 donde Anders Hallstrom y Roland Wimmerstedt plantearon un modelo de secado de partículas granulares de fertilizantes, este trabajo dio pie para que Timothy Langrish en 1991 planteara las siguientes expresiones:

$$w_D = w_{DI} f(\Phi)$$

Según el mismo Langrish, la función de difusividad puede tener los siguientes valores:

$$f = \Phi_B^{a-c} \text{ para } \Phi \leq \Phi_B$$

$$f = \Phi^a \text{ para } \Phi > \Phi_B$$

La difusión en el material está dada por el movimiento del agua en las diferentes capas del producto, lo anterior motivó el estudio de la difusión en capa limite, desde 1921, cuando se desarrollaron los modelos de velocidad de secado de Lewis y Brooker que eran muy aplicables a partículas en extremo delgadas tales como hojas de té y especias; en este caso fue hasta que Page en 1949 donde se involucraron variables como la velocidad del aire, la temperatura del mismo y la humedad a los modelos para generación de curvas de velocidad de secado, luego en 1960 Allen pudo establecer los tres estados de velocidad de secado apreciados en las curvas de humedad vs tiempo, gracias a estas curvas de secado se pudo inferir que además de la difusividad las investigaciones han encontrado que otras relaciones inciden de manera significativa en la dinámica de las operaciones de secado, gracias a Keey y Treybal en 1978 y 1980 respectivamente se encontró que la temperatura de bulbo húmedo y la temperatura de saturación del aire del medio ambiente jugaban un papel fundamental en la operación de secado ya que mostraban de manera adecuada el impacto que las perturbaciones en el medio modificaban el comportamiento de la remoción de la humedad de un material.

En el campo aplicado del procesamiento del arroz paddy, desde 1975 Mannapperuma hizo los primeros avances en análisis de la dinámica del proceso de secado de granos, para esto se fundamentó en los trabajos de modelación de secado de maíz realizados por Pabis y Henderson en 1962, donde encontraron que para el secado de los granos céreos es de vital importancia el fenómeno de diferencia de temperaturas que se genera en el interior de cada grano sobre todo en los primeros instantes del secado y el momento en el cual el grano puede ser considerado isotérmico. Después de esto se sobrevino una gran cantidad de investigaciones en términos de la dinámica del proceso de secado de arroz dentro de los que se destacan:

- Steffe y Singh en 1980 donde encontraron que la estructura del grano de arroz se modificaba de manera reversible e irreversible durante el proceso de secado y asemejaron el interior del grano a un polímero plástico.
- Aguerre en 1982 desarrolló el primer modelo aplicado al secado de arroz usando las consideraciones de Lewis y la teoría de la difusión del líquido.
- Lague en 1990 desarrolló los primeros modelos matemáticos que integraban las consideraciones de Steffe, Singh y Aguerre, proponiendo de manera académica el proceso de secado intermitente como método de garantía de la reversibilidad de los cambios estructurales del grano y a la vez mantenimiento de la zona óptima de difusión.
- Siebenmorgen y Lu en 1992 continuaron los trabajos de Lague y plantearon la teoría de la transición vítrea del arroz paddy, lo cual estableció los límites de seguridad en cuanto a temperatura, humedad removida y tiempo de exposición en el grano.

Después de los avances de Siebenmorgen y Lu, todas las investigaciones se enfocaron en profundizar los hallazgos de estos últimos en términos de incidencia del secado en la modificación estructural del grano más no en la modelación matemática.

En consecuencia se han desarrollado dos tipos de modelos para estimar el comportamiento de la operación de secado de arroz paddy, un primer bloque encargado de estimar el comportamiento de la difusividad del agua en el sistema y el segundo encargado de representar la operación de secado en sí, ambos a escala de laboratorio. Los modelos desarrollados se muestran a continuación:

Tabla 6. Modelos Experimentales de Determinación de la Difusividad en el Secado de Arroz y sus Subproductos

Tipo de Proceso	Tipo de Material	Desarrollado Por	Fecha de Generación	Modelo	A	B	D (m ² /s)	R ²
Secado Grano Corto	Endospermo	Steffe y Singh	1980 y 1982	$D = \frac{A e^{-(B/T)}}{3600}$	2,57E-03	2880	7,90E-11	NR
	Harina				0,797	5110	2,10E-11	NR
	Cascarilla				484	7380	9,70E-12	NR
	Integral				0,141	4350	4,10E-11	NR
	Paddy				33,6	6420	1,40E-11	NR
Secado Grano Corto Rehumedecido	Endospermo	Steffe y Singh	1980	$D = \frac{A e^{-(B/T)}}{3600}$	1,29E-02	3430	6,90E-11	0,84
	Harina				1,82	5400	1,90E-11	0,99
Secado Grano Largo (Bluebelle)	Paddy	Steffe y Singh	1982	$D = \frac{A e^{2B}}{3600}$	$A = (9,8787E - 5) e^{-(4248/T)}$	$B = 0,1557 \cdot 27,88$	3,20E-11	NR
Adsorción Grano Largo (Lemont)	Endospermo	Lu y Siebenmorgen	1992	$D = \frac{A e^{-(B/T)}}{3600}$	1,6163	5289,5	2,40E-11	0,91
	Harina				110,969	7052,5	6,50E-12	0,98
	Cascarilla				3,0101	6000,5	4,70E-12	0,99
	Integral				79,2446	6639,4	1,70E-11	0,98
	Paddy				5,9835	6101,4	6,80E-12	1
Adsorción Grano Largo (NewBonnet)	Endospermo	Lu y Siebenmorgen	1992	$D = \frac{A e^{-(B/T)}}{3600}$	1,6163	5289,5	2,40E-11	0,91
	Harina				110,969	7052,5	6,50E-12	0,98
	Cascarilla				3,0101	6000,5	4,70E-12	0,99
	Integral				79,2446	6639,4	1,70E-11	0,98
	Paddy				5,9835	6101,4	6,80E-12	1
Secado	Paddy	Rocco Ece y Cihan	1992	$D = \frac{0,05915 e^{-0,88 \left(\frac{-6706}{T-27,88} \right)}}{3600}$	NA	NA	7,30E-12	NR
Secado Grano Largo (Lemont)	Endospermo	Sarker	1994	$D = \frac{A \times 10^{-(B/T)}}{3600}$	3,77E-03	1213,3	1,50E-10	0,95
	Harina				3,82E-02	1941,1	7,60E-12	0,91
	Cascarilla				2,28E-01	2046,6	2,10E-11	0,96
Secado Grano Medio Parbolizado (Pankaj)	Endospermo	Igathinathane y Chattopadhyay	1999	$D = A e^{-(B/T)}$	1,08E-07	2036	1,70E-10	0,99
	Harina				3,99E-06	4096	9,40E-12	0,99
	Cascarilla				1,66E-05	4230	2,60E-11	0,99

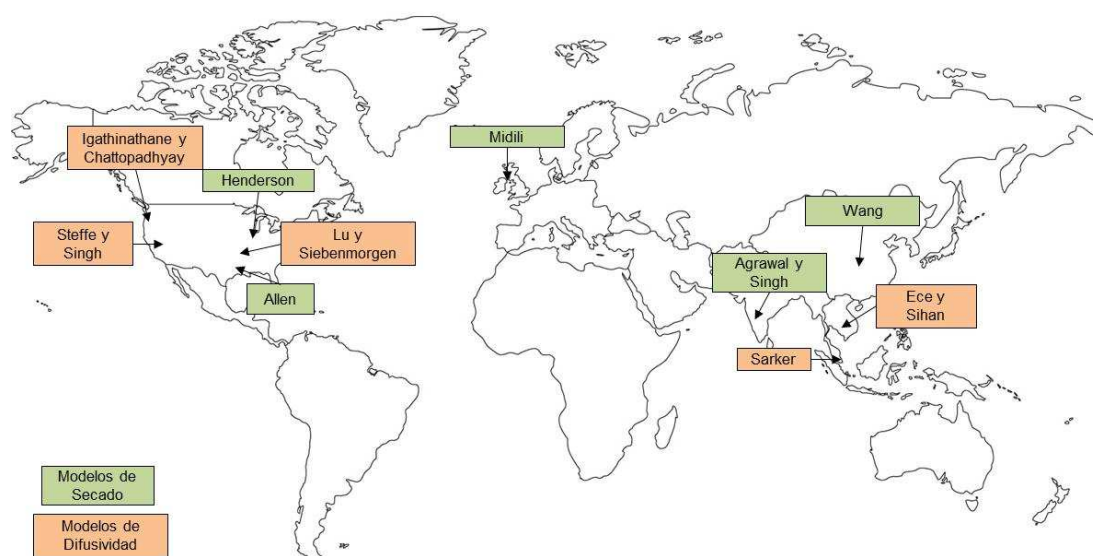
Se puede apreciar que todos los modelos de difusividad tienen una estructura similar, donde casi todos se basan en el modelo inicial de Steffe y Singh y las investigaciones se concentraron en la determinación de los coeficientes A y B. Por otra parte para el secado de paddy a escala de laboratorio se han desarrollado los siguientes modelos:

Tabla 7. Modelos Experimentales de Secado de Paddy en Laboratorio

Desarrollado Por	Fecha de Generación	Modelo
Allen	1960	$MR = e^{-kt}$
Henderson	1974	$MR = Ae^{-k_1 t} + Be^{-k_2 t}$
Agrawal y Singh	1977	$MR = e^{-kt^n}$
Wang	1978	$MR = 1 + At + Bt^2$
Midilli	2002	$MR = Ae^{-kt} + Bt$

En los modelos anteriores tanto k, A, B y n son constantes que dependen del ambiente, del medio de secado y del grano en sí mismo; los modelos anteriores muestran la dificultad de realización de las predicciones del proceso ya que hay muchos valores empíricos que dificultan el escalamiento a equipos de secado reales. A continuación se presenta la distribución geográfica de los modelos anteriormente citados:

Figura 9. Distribución Geográfica de los Modelos Propuestos



2.2.2 Estado de la Técnica

Comercialmente los sistemas de control de secado se enfocan en el monitoreo y transmisión de las variables de operación para que a través de una interfaz el operador haga los ajustes que considere necesarios; hasta la fecha solo BUHLER Aeroglides produce modelos para hacer ajustes automáticos de variables en base a la humedad objetivo, el resto de sistemas comerciales no realizan predicciones ni ajustes automáticos de parámetros. A continuación se presenta una breve reseña de los sistemas comerciales de control y monitoreo del secado industrial de granos.

2.2.2.1 Sistemas de Control AUTOMASEC CLP

Son fabricados por la empresa brasilera ELECTROWIDITEC, se fundamenta en el monitoreo de las siguientes variables:

- Tipo de Producto
- Temperatura del Aire de Secado
- Temperatura de la Masa de Grano
- Temperatura del Aire Húmedo
- Presión de Descarga del Aire Húmedo
- Humedad de Entrada de Producto
- Humedad de Salida de Producto
- Velocidad de Descarga de Producto

Además del monitoreo de las variables, el sistema AUTOMASEC CLP realiza las siguientes funciones:

- SCADA con pantalla táctil en el panel de control con teclas de acceso rápido a las funciones de modificación de variables operativas
- Sistema de almacenamiento de datos en memoria SD con registro automático de variables cada minuto
- Comunicación vía MODBUS-RTU y celular para envío de registros en vía remota

Figura 10. Imagen de Pantalla del Sistema AUTOMASEC CLP



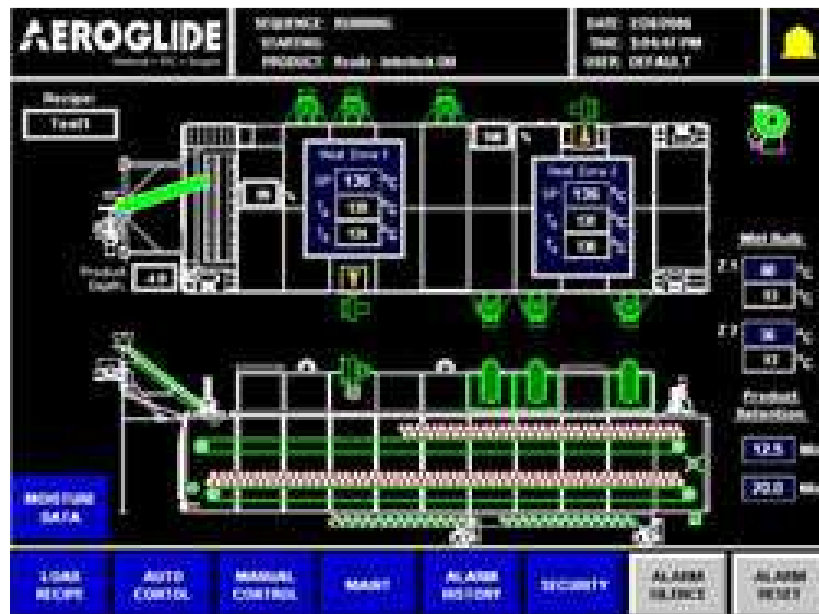
2.2.2.2 Sistemas de Control BUHLER Aeroglide

Bühler AG ofrece sistemas de control hechos a la medida, que se encargan de modelar la operación desde el punto de vista de balances de masa y energía, y comparan los resultados reales con los valores obtenidos después de realizar los balances, alarmando al operador cuando se presente una diferencia anómala en el desempeño del equipo, dándole la oportunidad al usuario de manejar control manual o automático del proceso, la técnica de control se llama ajuste de evaporación, las variables monitoreadas son:

- Flujo de producto
- Temperaturas de Secado
- Tiempo de Retención
- Temperatura del Bulbo Húmedo

El sistema se fundamenta en el cambio en la temperatura de bulbo húmedo para calcular la humedad removida en función de la carga de agua que se incrementa en el flujo de aire.

Figura 11. Imagen de Pantalla del Sistema PLC de BUHLER AEROGLIDE



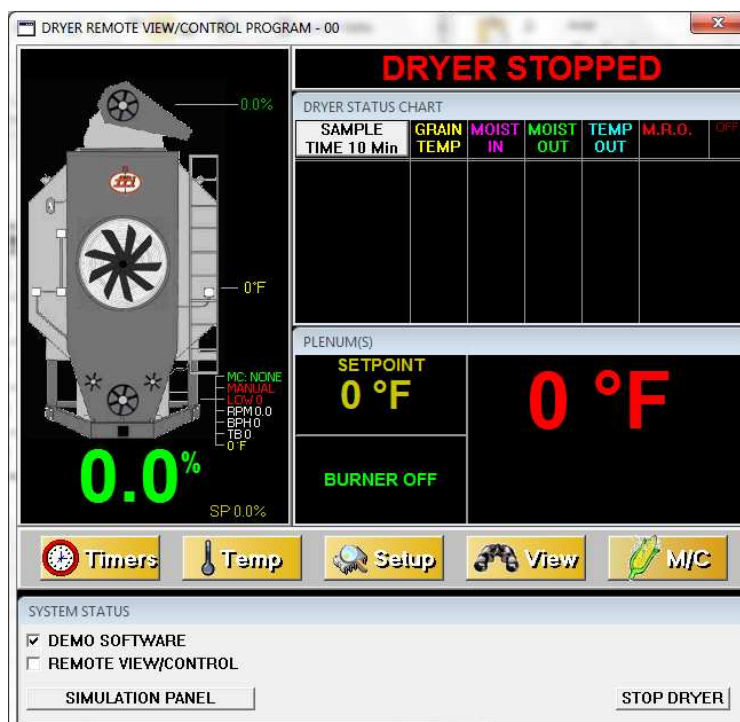
2.2.2.3 Sistemas de Monitoreo y Control VISION de GRAIN SYSTEMS INC

El sistema desarrollado por GRAIN SYSTEMS INC, tiene como objetivo realizar el control de la operación de secado usando buscando una reducción objetivo de humedad manteniendo una temperatura de secado constante salvo que se supere un límite de seguridad establecido por el usuario final. Además de esto también cuenta con el monitoreo de las siguientes variables:

- Temperatura de Aire Caliente
- Temperatura de Masa de Grano
- Humedad a la Entrada del Grano
- Humedad a la Salida del Grano
- Velocidad de Descarga
- Temperatura de Salida del Aire

El sistema VISION integra en el sistema de control a los quemadores de combustible para ajustar la temperatura una vez se alcance el nivel de seguridad alto en la temperatura del sistema.

Figura 12. Imagen de Pantalla del Sistema VISION de GRAIN SYSTEMS INC



2.2.2.4 Sistemas de Monitoreo y Control QUANTUM de BROCK DRYERS

El QUANTUM es un sistema desarrollado en base a controlar la humedad del grano, modificando el tiempo de retención en la secadora y la temperatura de secado; este sistema no modela la operación de secado sino que compara la humedad del grano en diferentes puntos de la secadora para ajustando la temperatura y la velocidad de descarga, se obtenga una humedad final deseada.

El sistema grafica la humedad medida en los diferentes puntos de la secadora y muestra la temperatura de trabajo, así como una serie de controles manuales que permiten interrumpir o pausar la operación:

Figura 13. Imagen de Pantalla del Sistema QUANTUM de BROCK DRYERS



Así como en el caso de los modelos matemáticos, a continuación se presenta una distribución geográfica de los sistemas de control anteriormente citados:

Figura 14. Distribución Geográfica de los Sistemas Comerciales de Control de Secado Citados



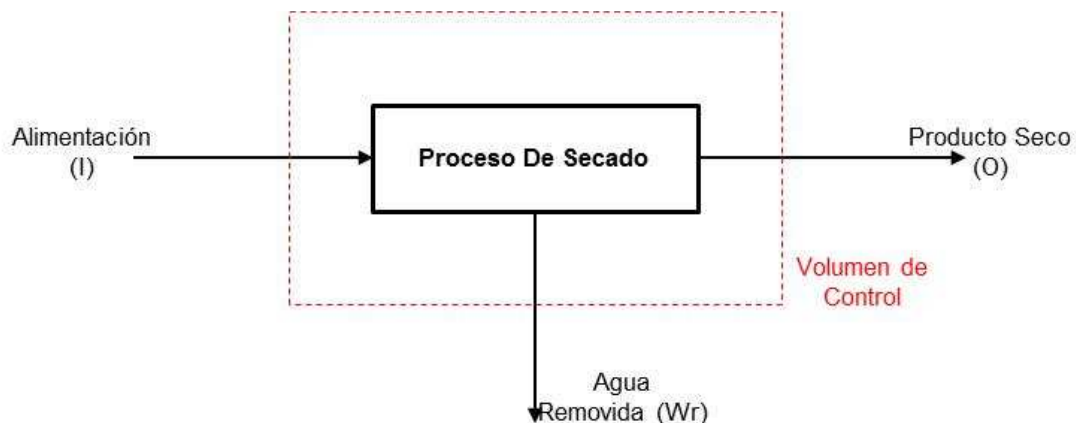
CAPÍTULO 3. MODELAMIENTO DEL PROCESO

Para poder establecer cual sería la mejor estrategia de control del sistema, es de vital importancia el poder modelar de manera estática y dinámica cada una de las operaciones que lo componen, a continuación se hace una aproximación al modelamiento de cada una de dichas secciones.

3.1 MODELAMIENTO DE LA OPERACIÓN DE SECADO

3.1.1 Balance de masa por el lado del producto

Figura 15. Proceso de Secado por el Lado del Producto



De acuerdo a la figura 10, el balance de masa por el lado del producto sería:

$$\dot{m}_i(t) - \dot{m}_o(t) - \dot{m}_{wr}(t) = \frac{d[\rho_{Pd}(t)V_{Eq}]}{dt} \quad ; [1 \text{ Ecuación}; 3 \text{ Incógnitas}] \quad \textbf{Ecuación 3.1}$$

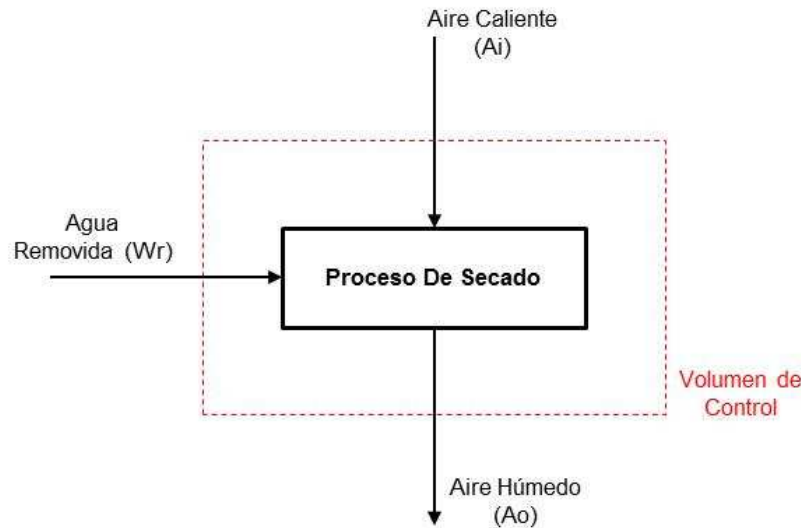
En la ecuación anterior los términos corresponden a:

- $\dot{m}_i(t)$ = Flujo másico del producto a la entrada del proceso
- $\dot{m}_o(t)$ = Flujo másico del producto a la salida del proceso
- $\dot{m}_{wr}(t)$ = Flujo másico de agua removida en el proceso
- $\rho_{Pd}(t)$ = Densidad del producto retenido en el secador
- V_{Eq} = Volumen contenido en el secador

De los términos anteriores se conocen $(\dot{m}_i(t); V_{Eq})$ mientras que $(\dot{m}_o(t); \dot{m}_{wr}(t); \rho_{Pd}(t))$ son incógnitas.

3.1.2 Balance de Masa por el Lado del Aire

Figura 16. Proceso de Secado por el Lado del Aire



De acuerdo a la figura 10, el balance de masa por el lado del aire sería:

$$\dot{m}_{Ai}(t) - \dot{m}_{Ao}(t) + \dot{m}_{wr}(t) = 0$$

Pero los flujos másicos del aire caliente y húmedo pueden ser expresados en función de la humedad del aire, con lo cual el balance de masa por el lado del aire quedaría:

$$\dot{m}_{As}(1 + w_i(t)) - \dot{m}_{As}(1 + w_o(t)) + \dot{m}_{wr}(t) = 0$$

$$\dot{m}_{As}(w_i(t) - w_o(t)) + \dot{m}_{wr}(t) = 0 ; [2 \text{ Ecuaciones; } 4 \text{ Incógnitas}] \text{ Ecuación 3.2}$$

En la ecuación anterior los términos nuevos corresponden a:

- \dot{m}_{As} = Flujo másico de aire seco en el proceso
- $w_i(t)$ = Humedad absoluta del aire a la entrada del proceso
- $w_o(t)$ = Humedad absoluta del aire a la salida del proceso

De los términos anteriores se conocen $(\dot{m}_{As}; w_i(t))$ y es incógnita $(w_o(t))$

3.1.3 Tasa de Secado

Para seguir con el modelamiento del sistema, se va a relacionar al flujo másico de agua removida con la velocidad de secado:

$$\dot{m}_{wr}(t) = R * A$$

Pero la tasa de secado (R) puede expresarse como [20]:

$$R = -\frac{L_s}{A} \left(\frac{dX}{dt} \right)$$

Por lo tanto el flujo másico de agua removida puede ser expresado como:

$$\dot{m}_{wr}(t) = -L_s \left(\frac{dX}{dt} \right) ; [3 \text{ Ecuaciones; } 5 \text{ Incógnitas}] \textbf{Ecuación 3.3}$$

Con esta ecuación se introducen los siguientes términos:

- L_s = Cantidad de materia seca a procesar
- $\frac{dX}{dt}$ = Razón de merma de humedad

De los términos anteriores se conoce (L_s) y es incógnita (X). Pero además de eso los flujos másicos de producto (Ver ítem 3.1.1) podrían ser expresados en función de los dos términos de la tasa de secado, dejando la ecuación 1 de la siguiente forma:

$$L_s[1 + X_i(t)] - L_s[1 + X_o(t)] - \dot{m}_{wr}(t) = \frac{d[\rho_{Pd}(t)V_{Eq}]}{dt}$$

$$L_s[X_i(t) - X_o(t)] - \dot{m}_{wr}(t) = \frac{d[\rho_{Pd}(t)V_{Eq}]}{dt} ; [3 \text{ Ecuaciones; } 5 \text{ Incógnitas}]$$

Ecuación 3.1.1

Al transformar la ecuación 1 se eliminan del sistema ($\dot{m}_i(t); \dot{m}_o(t)$) y entran ($L_s; X_i(t); X_o(t)$) donde ($L_s; X_i(t)$) son conocidas y ($X_o(t)$) es la incógnita.

3.1.4 Densidad del Producto

La densidad del grano de paddy va variando en función de la humedad del mismo, según Sepirood para granos largos en variedad Indica, la densidad viene dada por:

$$\rho_{Pd} = 609,5X_i(t) + 481,82 ; [4 \text{ Ecuaciones; } 5 \text{ Incógnitas}] \textbf{Ecuación 3.4}$$

3.1.5 Razón de Merma de Humedad

La razón de merma de humedad varía durante el proceso de secado, si se revisan datos experimentales, se podría establecer que esto se puede originar debido varios factores:

- La Temperatura de Secado
- La Temperatura de Saturación del Medio Ambiente
- La Temperatura de Evaporación del Agua del Sólido
- La Humedad Inicial del Producto
- El Número Adimensional de Sherwood (Como indicador de las condiciones de transferencia de masa)

Para el análisis se tomaron las siguientes consideraciones:

3.1.5.1 Consideración 1

Los datos experimentales corresponden a resultados de campo del desempeño de la secadora industrial ST-30AX en el periodo comprendido entre Diciembre 12 de 2012 y Diciembre 19 de 2012, donde se pudieron procesar siete (07) lotes de grano de 32MT cada uno con humedades iniciales variables y con diferentes condiciones ambientales de procesamiento cada uno.

3.1.5.2 Consideración 2

Para evaluar la incidencia del trabajo térmico realizado para acondicionar el aire en el proceso de secado, se propone el uso del siguiente numero adimensional llamado N_t o (Numero térmico de secado), definido como:

$$N_t = \frac{\text{Delta Termico de Secado}}{\text{Delta Termico de Saturación}} = \frac{T_{\text{Secado}} - T_{\text{Evaporacion}}}{T_{\text{Secado}} - T_{\text{Saturación}}}$$

Teniendo en cuenta que el agua en el sólido se evapora a la temperatura de bulbo húmedo del aire caliente y que la temperatura de saturación es la misma temperatura de rocío del aire, entonces N_t sería:

$$N_t = \frac{T_{\text{Secado}} - T_{wb}}{T_{\text{Secado}} - T_{dp}}$$

3.1.5.3 Consideración 3

Para definir las condiciones de transferencia de masa, se usaran los modelos de determinación de difusividad de Lu y Siebenmorgen (1992) ya que estos muestran un coeficiente de correlación sumamente alto y además fueron desarrollados para variedades de granos largos equivalentes a los procesados en el espectro de análisis realizado; además para la determinación de los números adimensionales de transferencia de masa, se usaran las siguientes ecuaciones:

Número de Schmidt

$$Sc = \frac{\mu_{vapor}}{\rho_{vapor} D_{Agua/Aire}}$$

Numero de Reynolds

$$Re = \frac{\overrightarrow{V_{Aire}} D_{E Plenum} \rho_{Aire}}{\mu_{Aire}}$$

Número de Sherwood

$$Sh = \frac{h_m d_k}{D_{Agua/Aire}} = 2 + 0,522 Re^{0,5} Sc^{0,33}$$

A continuación se presentan las matrices de datos experimentales obtenidos (Ver siguiente página)

Tabla 8. Resultados Experimentales Usando el Modelo de Cálculo de Difusividad por Adsorción de Lu y Siebenmorgen para la Variedad Lemont.

Tiempo (h)	T (K)	MC (%)	Tamb (K)	Twb secado (K)	Tsat (K)	paire (Kg/m3) secado	μ aire (Pa*s)	μ agua (Pa*s)	Densidad Agua (Kg/m3)	Re Aire	D (m2/s)	Schmidt	Sh^3	(Nt^4)	X (KgH2O/KgSS)	dX/dt (KgH2O/KgSSh)
0	328,15	0,31	293,15	300,85	290,15	1,075	2,220E-05	9,9436E-06	0,02682	26501,10	2,588E-12	1,43E+08	8,79E+13	0,2664	0,4493	0,0906
1	328,15	0,264	295,37	300,85	290,35	1,075	2,220E-05	9,9436E-06	0,02682	26501,10	2,588E-12	1,43E+08	8,79E+13	0,2721	0,3587	0,0324
2	323,15	0,246	296,48	299,85	290,65	1,091	2,200E-05	9,9146E-06	0,02537	27155,79	2,419E-12	1,62E+08	1,03E+14	0,2642	0,3263	0,0259
3	323,15	0,231	299,26	300,15	291,15	1,091	2,200E-05	9,9236E-06	0,0258	27155,79	2,468E-12	1,56E+08	9,92E+13	0,2669	0,3004	0,0362
4	323,15	0,209	300,37	300,25	291,45	1,091	2,200E-05	9,9264E-06	0,02594	27155,79	2,485E-12	1,54E+08	9,80E+13	0,2723	0,2642	0,0079
5	323,15	0,204	299,82	300,05	291,15	1,091	2,200E-05	9,9207E-06	0,02566	27155,79	2,452E-12	1,58E+08	1,00E+14	0,2715	0,2563	0,0063
6	316,15	0,2	300,37	299,05	292,45	1,116	2,172E-05	9,8923E-06	0,02427	28114,88	2,290E-12	1,78E+08	1,19E+14	0,2710	0,2500	0,0245
7	316,15	0,184	299,26	298,95	292,15	1,116	2,172E-05	9,8893E-06	0,02413	28114,88	2,275E-12	1,80E+08	1,21E+14	0,2638	0,2255	0,0060
8	316,15	0,18	298,71	298,15	290,65	1,116	2,172E-05	9,8666E-06	0,02307	28114,88	2,154E-12	1,99E+08	1,33E+14	0,2483	0,2195	0,0074
9	316,15	0,175	295,93	298,35	291,05	1,116	2,172E-05	9,8721E-06	0,02333	28114,88	2,183E-12	1,94E+08	1,30E+14	0,2529	0,2121	0,0068
10,5	316,15	0,168	294,26	298,45	291,25	1,116	2,172E-05	9,8752E-06	0,02347	28114,88	2,198E-12	1,91E+08	1,28E+14	0,2553	0,2019	0,0058
11,5	316,15	0,164	293,15	297,85	290,05	1,116	2,172E-05	9,858E-06	0,02269	28114,88	2,110E-12	2,06E+08	1,38E+14	0,2417	0,1962	0,0057
12,5	316,15	0,16	292,04	297,85	290,05	1,116	2,172E-05	9,858E-06	0,02269	28114,88	2,110E-12	2,06E+08	1,38E+14	0,2417	0,1905	0,0056
13,5	316,15	0,156	292,04	297,85	290,05	1,116	2,172E-05	9,858E-06	0,02269	28114,88	2,110E-12	2,06E+08	1,38E+14	0,2417	0,1848	0,0084
14,5	316,15	0,15	291,48	297,65	289,65	1,116	2,172E-05	9,8525E-06	0,02243	28114,88	2,081E-12	2,11E+08	1,42E+14	0,2375	0,1765	0,0096
15,5	316,15	0,143	290,93	297,35	288,95	1,116	2,172E-05	9,844E-06	0,02205	28114,88	2,038E-12	2,19E+08	1,47E+14	0,2282	0,1669	0,0054
0	328,15	0,264	293,15	300,85	290,15	1,075	2,220E-05	9,9436E-06	0,02682	26501,10	2,588E-12	1,43E+08	8,79E+13	0,2664	0,3587	0,0324
1	328,15	0,246	295,93	301,25	291,05	1,075	2,220E-05	9,9551E-06	0,02742	26501,10	2,658E-12	1,37E+08	8,38E+13	0,2764	0,3263	0,0259
2	328,15	0,231	297,04	301,15	291,05	1,075	2,220E-05	9,9523E-06	0,02727	26501,10	2,641E-12	1,38E+08	8,48E+13	0,2805	0,3004	0,0566
3	325,15	0,196	299,26	300,45	290,35	1,085	2,208E-05	9,9321E-06	0,02623	26890,97	2,519E-12	1,50E+08	9,43E+13	0,2538	0,2438	0,0447
4	327,15	0,166	299,26	301,15	290,35	1,078	2,216E-05	9,9523E-06	0,02727	26630,08	2,641E-12	1,38E+08	8,54E+13	0,2492	0,1990	0,0156
5	325,15	0,155	300,93	300,75	291,05	1,085	2,208E-05	9,9408E-06	0,02667	26890,97	2,570E-12	1,45E+08	9,10E+13	0,2621	0,1834	0,0138
0	325,15	0,231	293,15	300,35	290,15	1,085	2,208E-05	9,9293E-06	0,02609	26890,97	2,502E-12	1,52E+08	9,54E+13	0,2521	0,3004	0,0566
1	327,15	0,196	295,37	301,55	291,35	1,078	2,216E-05	9,9638E-06	0,02787	26630,08	2,713E-12	1,32E+08	8,15E+13	0,2615	0,2438	0,0198
2	327,15	0,183	297,04	301,65	291,45	1,078	2,216E-05	9,9667E-06	0,02803	26630,08	2,731E-12	1,30E+08	8,05E+13	0,2603	0,2240	0,0074
3	328,15	0,178	299,26	301,75	292,15	1,075	2,220E-05	9,9695E-06	0,02818	26501,10	2,749E-12	1,29E+08	7,90E+13	0,2892	0,2165	0,0074
4	328,15	0,173	299,26	301,75	292,15	1,075	2,220E-05	9,9695E-06	0,02818	26501,10	2,749E-12	1,29E+08	7,90E+13	0,2892	0,2092	0,0201
5	331,15	0,159	299,82	302,45	292,45	1,065	2,232E-05	9,9898E-06	0,02928	26119,83	2,881E-12	1,18E+08	7,11E+13	0,3025	0,1891	0,0084

Tabla 8. Continuación

Tiempo (h)	T (K)	MC (%)	Tamb (K)	Twb secado (K)	Tsat (K)	paire (Kg/m3) secado	μ aire (Pa*s)	μ agua (Pa*s)	Densidad Agua (Kg/m3)	Re Aire	D (m2/s)	Schmidt	Sh^3	(Nt^4)	X (KgH2O/KgSS)	dX/dt (KgH2O/KgSSh)
6	330,15	0,153	300,37	302,75	293,45	1,068	2,228E-05	9,9985E-06	0,02976	26245,98	2,939E-12	1,14E+08	6,91E+13	0,3107	0,1806	0,0042
7	330,15	0,15	299,26	302,15	292,15	1,068	2,228E-05	9,9811E-06	0,0288	26245,98	2,824E-12	1,23E+08	7,42E+13	0,2948	0,1765	0,0191
0	325,15	0,214	295,93	300,75	291,05	1,085	2,208E-05	9,9408E-06	0,02667	26890,97	2,570E-12	1,45E+08	9,10E+13	0,2621	0,2723	0,0238
1	328,15	0,199	298,71	302,85	294,55	1,075	2,220E-05	1,0001E-05	0,02992	26501,10	2,959E-12	1,13E+08	6,93E+13	0,3215	0,2484	0,0244
2	326,15	0,183	293,71	300,75	291,15	1,081	2,212E-05	9,9408E-06	0,02667	26760,04	2,570E-12	1,45E+08	9,03E+13	0,2774	0,2240	0,0133
3	329,15	0,174	293,15	301,05	290,15	1,071	2,224E-05	9,9494E-06	0,02712	26373,06	2,623E-12	1,40E+08	8,52E+13	0,2695	0,2107	0,0173
4	328,15	0,162	293,15	300,85	290,15	1,075	2,220E-05	9,9436E-06	0,02682	26501,10	2,588E-12	1,43E+08	8,79E+13	0,2664	0,1933	0,0099
5	328,15	0,155	293,15	300,85	290,15	1,075	2,220E-05	9,9436E-06	0,02682	26501,10	2,588E-12	1,43E+08	8,79E+13	0,2664	0,1834	0,0083
6	328,15	0,149	293,15	300,85	290,15	1,075	2,220E-05	9,9436E-06	0,02682	26501,10	2,588E-12	1,43E+08	8,79E+13	0,2664	0,1751	0,0110
0	329,15	0,23	292,04	300,95	290,05	1,071	2,224E-05	9,9465E-06	0,02697	26373,06	2,605E-12	1,42E+08	8,62E+13	0,2706	0,2987	0,0657
1	329,15	0,189	294,26	301,55	291,25	1,071	2,224E-05	9,9638E-06	0,02787	26373,06	2,713E-12	1,32E+08	8,03E+13	0,2812	0,2330	0,0180
2	328,15	0,177	296,48	301,35	291,35	1,075	2,220E-05	9,958E-06	0,02757	26501,10	2,676E-12	1,35E+08	8,28E+13	0,2813	0,2151	0,0029
3	328,15	0,175	298,15	301,25	291,15	1,075	2,220E-05	9,9551E-06	0,02742	26501,10	2,658E-12	1,37E+08	8,38E+13	0,2794	0,2121	0,0159
4	329,15	0,164	300,37	301,55	291,45	1,071	2,224E-05	9,9638E-06	0,02787	26373,06	2,713E-12	1,32E+08	8,03E+13	0,2873	0,1962	0,0085
5	330,15	0,158	300,37	301,75	291,45	1,068	2,228E-05	9,9695E-06	0,02818	26245,98	2,749E-12	1,29E+08	7,78E+13	0,2900	0,1876	0,0139
6	327,15	0,148	300,37	301,55	291,45	1,078	2,216E-05	9,9638E-06	0,02787	26630,08	2,713E-12	1,32E+08	8,15E+13	0,2644	0,1737	0,0190
0	329,15	0,21	298,15	301,05	290,15	1,071	2,224E-05	9,9494E-06	0,02712	26373,06	2,623E-12	1,40E+08	8,52E+13	0,2695	0,2658	0,0508
1	327,15	0,177	295,93	300,95	289,95	1,078	2,216E-05	9,9465E-06	0,02697	26630,08	2,605E-12	1,42E+08	8,75E+13	0,2461	0,2151	0,0117
2	326,15	0,169	294,82	300,25	290,05	1,081	2,212E-05	9,9264E-06	0,02594	26760,04	2,485E-12	1,54E+08	9,59E+13	0,2650	0,2034	0,0129
3	326,15	0,16	293,15	300,35	290,15	1,081	2,212E-05	9,9293E-06	0,02609	26760,04	2,502E-12	1,52E+08	9,47E+13	0,2638	0,1905	0,0042
4	326,15	0,157	293,15	300,35	290,15	1,081	2,212E-05	9,9293E-06	0,02609	26760,04	2,502E-12	1,52E+08	9,47E+13	0,2638	0,1862	0,0070
5	327,15	0,152	292,04	300,95	290,05	1,078	2,216E-05	9,9465E-06	0,02697	26630,08	2,605E-12	1,42E+08	8,75E+13	0,2487	0,1792	0,0146
0	328,15	0,211	295,37	301,35	291,35	1,075	2,220E-05	9,958E-06	0,02757	26501,10	2,676E-12	1,35E+08	8,28E+13	0,2813	0,2674	0,0479
1	328,15	0,18	295,93	301,25	291,05	1,075	2,220E-05	9,9551E-06	0,02742	26501,10	2,658E-12	1,37E+08	8,38E+13	0,2764	0,2195	0,0118
2	328,15	0,172	297,04	301,05	290,75	1,075	2,220E-05	9,9494E-06	0,02712	26501,10	2,623E-12	1,40E+08	8,58E+13	0,2757	0,2077	0,0187
3	328,15	0,159	299,26	301,75	292,15	1,075	2,220E-05	9,9695E-06	0,02818	26501,10	2,749E-12	1,29E+08	7,90E+13	0,2892	0,1891	0,0070
4	329,15	0,154	300,93	301,85	291,95	1,071	2,224E-05	9,9724E-06	0,02833	26373,06	2,768E-12	1,27E+08	7,75E+13	0,2901	0,1820	0,0124
5	328,15	0,145	299,82	301,35	291,45	1,075	2,220E-05	9,958E-06	0,02757	26501,10	2,676E-12	1,35E+08	8,28E+13	0,2844	0,1696	0,0068
6	328,15	0,14	300,37	301,35	291,45	1,075	2,220E-05	9,958E-06	0,02757	26501,10	2,676E-12	1,35E+08	8,28E+13	0,2844	0,1628	0,0108

Tabla 9. Resultados Experimentales Usando el Modelo de Cálculo de Difusividad por Adsorción de Lu y Siebenmorgen para la Variedad Newbonnet.

Tiempo (h)	T (K)	MC (%)	Tamb (K)	Twb secado (K)	Tsat (K)	paire (Kg/m3) secado	μ aire (Pa*s)	μ agua (Pa*s)	Densidad Agua (Kg/m3)	Re Aire	D (m2/s)	Schmidt	Sh^3	(Nt)^4	X (KgH2O/KgSS)	dX/dt (KgH2O/KgSsh)
0	328,15	0,31	293,15	300,85	290,15	1,075	2,220E-05	9,9436E-06	0,02682	26501,10	2,366E-12	1,57E+08	9,62E+13	0,2664	0,4493	0,0906
1	328,15	0,264	295,37	300,85	290,35	1,075	2,220E-05	9,9436E-06	0,02682	26501,10	2,366E-12	1,57E+08	9,62E+13	0,2721	0,3587	0,0324
2	323,15	0,246	296,48	299,85	290,65	1,091	2,200E-05	9,9146E-06	0,02537	27155,79	2,216E-12	1,76E+08	1,12E+14	0,2642	0,3263	0,0259
3	323,15	0,231	299,26	300,15	291,15	1,091	2,200E-05	9,9236E-06	0,0258	27155,79	2,260E-12	1,70E+08	1,08E+14	0,2669	0,3004	0,0362
4	323,15	0,209	300,37	300,25	291,45	1,091	2,200E-05	9,9264E-06	0,02594	27155,79	2,275E-12	1,68E+08	1,07E+14	0,2723	0,2642	0,0079
5	323,15	0,204	299,82	300,05	291,15	1,091	2,200E-05	9,9207E-06	0,02566	27155,79	2,245E-12	1,72E+08	1,10E+14	0,2715	0,2563	0,0063
6	316,15	0,2	300,37	299,05	292,45	1,116	2,172E-05	9,8923E-06	0,02427	28114,88	2,102E-12	1,94E+08	1,30E+14	0,2710	0,2500	0,0245
7	316,15	0,184	299,26	298,95	292,15	1,116	2,172E-05	9,8893E-06	0,02413	28114,88	2,088E-12	1,96E+08	1,32E+14	0,2638	0,2255	0,0060
8	316,15	0,18	298,71	298,15	290,65	1,116	2,172E-05	9,8666E-06	0,02307	28114,88	1,980E-12	2,16E+08	1,45E+14	0,2483	0,2195	0,0074
9	316,15	0,175	295,93	298,35	291,05	1,116	2,172E-05	9,8721E-06	0,02333	28114,88	2,007E-12	2,11E+08	1,41E+14	0,2529	0,2121	0,0068
10,5	316,15	0,168	294,26	298,45	291,25	1,116	2,172E-05	9,8752E-06	0,02347	28114,88	2,020E-12	2,08E+08	1,40E+14	0,2553	0,2019	0,0058
11,5	316,15	0,164	293,15	297,85	290,05	1,116	2,172E-05	9,858E-06	0,02269	28114,88	1,941E-12	2,24E+08	1,50E+14	0,2417	0,1962	0,0057
12,5	316,15	0,16	292,04	297,85	290,05	1,116	2,172E-05	9,858E-06	0,02269	28114,88	1,941E-12	2,24E+08	1,50E+14	0,2417	0,1905	0,0056
13,5	316,15	0,156	292,04	297,85	290,05	1,116	2,172E-05	9,858E-06	0,02269	28114,88	1,941E-12	2,24E+08	1,50E+14	0,2417	0,1848	0,0084
14,5	316,15	0,15	291,48	297,65	289,65	1,116	2,172E-05	9,8525E-06	0,02243	28114,88	1,915E-12	2,29E+08	1,54E+14	0,2375	0,1765	0,0096
15,5	316,15	0,143	290,93	297,35	288,95	1,116	2,172E-05	9,844E-06	0,02205	28114,88	1,877E-12	2,38E+08	1,59E+14	0,2282	0,1669	0,0054
0	328,15	0,264	293,15	300,85	290,15	1,075	2,220E-05	9,9436E-06	0,02682	26501,10	2,366E-12	1,57E+08	9,62E+13	0,2664	0,3587	0,0324
1	328,15	0,246	295,93	301,25	291,05	1,075	2,220E-05	9,9551E-06	0,02742	26501,10	2,429E-12	1,49E+08	9,17E+13	0,2764	0,3263	0,0259
2	328,15	0,231	297,04	301,15	291,05	1,075	2,220E-05	9,9523E-06	0,02727	26501,10	2,413E-12	1,51E+08	9,28E+13	0,2805	0,3004	0,0566
3	325,15	0,196	299,26	300,45	290,35	1,085	2,208E-05	9,9321E-06	0,02623	26890,97	2,305E-12	1,64E+08	1,03E+14	0,2538	0,2438	0,0447
4	327,15	0,166	299,26	301,15	290,35	1,078	2,216E-05	9,9523E-06	0,02727	26630,08	2,413E-12	1,51E+08	9,35E+13	0,2492	0,1990	0,0156
5	325,15	0,155	300,93	300,75	291,05	1,085	2,208E-05	9,9408E-06	0,02667	26890,97	2,351E-12	1,59E+08	9,95E+13	0,2621	0,1834	0,0138
0	325,15	0,231	293,15	300,35	290,15	1,085	2,208E-05	9,9293E-06	0,02609	26890,97	2,290E-12	1,66E+08	1,04E+14	0,2521	0,3004	0,0566
1	327,15	0,196	295,37	301,55	291,35	1,078	2,216E-05	9,9638E-06	0,02787	26630,08	2,477E-12	1,44E+08	8,92E+13	0,2615	0,2438	0,0198
2	327,15	0,183	297,04	301,65	291,45	1,078	2,216E-05	9,9667E-06	0,02803	26630,08	2,493E-12	1,43E+08	8,82E+13	0,2603	0,2240	0,0074
3	328,15	0,178	299,26	301,75	292,15	1,075	2,220E-05	9,9695E-06	0,02818	26501,10	2,509E-12	1,41E+08	8,65E+13	0,2892	0,2165	0,0074
4	328,15	0,173	299,26	301,75	292,15	1,075	2,220E-05	9,9695E-06	0,02818	26501,10	2,509E-12	1,41E+08	8,65E+13	0,2892	0,2092	0,0201
5	331,15	0,159	299,82	302,45	292,45	1,065	2,232E-05	9,9898E-06	0,02928	26119,83	2,626E-12	1,30E+08	7,80E+13	0,3025	0,1891	0,0084

Tabla 9. Continuación

Tiempo (h)	T (K)	MC (%)	Tamb (K)	Twb secado (K)	Tsat (K)	paire (Kg/m3) secado	μ aire (Pa*s)	μ agua (Pa*s)	Densidad Agua (Kg/m3)	Re Aire	D (m2/s)	Schmidt	Sh^3	(Nt)^4	X (KgH2O/KgSS)	dX/dt (KgH2O/KgSSh)
6	330,15	0,153	300,37	302,75	293,45	1,068	2,228E-05	9,9985E-06	0,02976	26245,98	2,677E-12	1,25E+08	7,59E+13	0,3107	0,1806	0,0042
7	330,15	0,15	299,26	302,15	292,15	1,068	2,228E-05	9,9811E-06	0,0288	26245,98	2,575E-12	1,35E+08	8,14E+13	0,2948	0,1765	0,0191
0	325,15	0,214	295,93	300,75	291,05	1,085	2,208E-05	9,9408E-06	0,02667	26890,97	2,351E-12	1,59E+08	9,95E+13	0,2621	0,2723	0,0238
1	328,15	0,199	298,71	302,85	294,55	1,075	2,220E-05	1,0001E-05	0,02992	26501,10	2,694E-12	1,24E+08	7,61E+13	0,3215	0,2484	0,0244
2	326,15	0,183	293,71	300,75	291,15	1,081	2,212E-05	9,9408E-06	0,02667	26760,04	2,351E-12	1,59E+08	9,87E+13	0,2774	0,2240	0,0133
3	329,15	0,174	293,15	301,05	290,15	1,071	2,224E-05	9,9494E-06	0,02712	26373,06	2,397E-12	1,53E+08	9,32E+13	0,2695	0,2107	0,0173
4	328,15	0,162	293,15	300,85	290,15	1,075	2,220E-05	9,9436E-06	0,02682	26501,10	2,366E-12	1,57E+08	9,62E+13	0,2664	0,1933	0,0099
5	328,15	0,155	293,15	300,85	290,15	1,075	2,220E-05	9,9436E-06	0,02682	26501,10	2,366E-12	1,57E+08	9,62E+13	0,2664	0,1834	0,0083
6	328,15	0,149	293,15	300,85	290,15	1,075	2,220E-05	9,9436E-06	0,02682	26501,10	2,366E-12	1,57E+08	9,62E+13	0,2664	0,1751	0,0110
0	329,15	0,23	292,04	300,95	290,05	1,071	2,224E-05	9,9465E-06	0,02697	26373,06	2,382E-12	1,55E+08	9,43E+13	0,2706	0,2987	0,0657
1	329,15	0,189	294,26	301,55	291,25	1,071	2,224E-05	9,9638E-06	0,02787	26373,06	2,477E-12	1,44E+08	8,79E+13	0,2812	0,2330	0,0180
2	328,15	0,177	296,48	301,35	291,35	1,075	2,220E-05	9,958E-06	0,02757	26501,10	2,445E-12	1,48E+08	9,07E+13	0,2813	0,2151	0,0029
3	328,15	0,175	298,15	301,25	291,15	1,075	2,220E-05	9,9551E-06	0,02742	26501,10	2,429E-12	1,49E+08	9,17E+13	0,2794	0,2121	0,0159
4	329,15	0,164	300,37	301,55	291,45	1,071	2,224E-05	9,9638E-06	0,02787	26373,06	2,477E-12	1,44E+08	8,79E+13	0,2873	0,1962	0,0085
5	330,15	0,158	300,37	301,75	291,45	1,068	2,228E-05	9,9695E-06	0,02818	26245,98	2,509E-12	1,41E+08	8,53E+13	0,2900	0,1876	0,0139
6	327,15	0,148	300,37	301,55	291,45	1,078	2,216E-05	9,9638E-06	0,02787	26630,08	2,477E-12	1,44E+08	8,92E+13	0,2644	0,1737	0,0190
0	329,15	0,21	298,15	301,05	290,15	1,071	2,224E-05	9,9494E-06	0,02712	26373,06	2,397E-12	1,53E+08	9,32E+13	0,2695	0,2658	0,0508
1	327,15	0,177	295,93	300,95	289,95	1,078	2,216E-05	9,9465E-06	0,02697	26630,08	2,382E-12	1,55E+08	9,57E+13	0,2461	0,2151	0,0117
2	326,15	0,169	294,82	300,25	290,05	1,081	2,212E-05	9,9264E-06	0,02594	26760,04	2,275E-12	1,68E+08	1,05E+14	0,2650	0,2034	0,0129
3	326,15	0,16	293,15	300,35	290,15	1,081	2,212E-05	9,9293E-06	0,02609	26760,04	2,290E-12	1,66E+08	1,03E+14	0,2638	0,1905	0,0042
4	326,15	0,157	293,15	300,35	290,15	1,081	2,212E-05	9,9293E-06	0,02609	26760,04	2,290E-12	1,66E+08	1,03E+14	0,2638	0,1862	0,0070
5	327,15	0,152	292,04	300,95	290,05	1,078	2,216E-05	9,9465E-06	0,02697	26630,08	2,382E-12	1,55E+08	9,57E+13	0,2487	0,1792	0,0146
0	328,15	0,211	295,37	301,35	291,35	1,075	2,220E-05	9,958E-06	0,02757	26501,10	2,445E-12	1,48E+08	9,07E+13	0,2813	0,2674	0,0479
1	328,15	0,18	295,93	301,25	291,05	1,075	2,220E-05	9,9551E-06	0,02742	26501,10	2,429E-12	1,49E+08	9,17E+13	0,2764	0,2195	0,0118
2	328,15	0,172	297,04	301,05	290,75	1,075	2,220E-05	9,9494E-06	0,02712	26501,10	2,397E-12	1,53E+08	9,39E+13	0,2757	0,2077	0,0187
3	328,15	0,159	299,26	301,75	292,15	1,075	2,220E-05	9,9695E-06	0,02818	26501,10	2,509E-12	1,41E+08	8,65E+13	0,2892	0,1891	0,0070
4	329,15	0,154	300,93	301,85	291,95	1,071	2,224E-05	9,9724E-06	0,02833	26373,06	2,526E-12	1,39E+08	8,49E+13	0,2901	0,1820	0,0124
5	328,15	0,145	299,82	301,35	291,45	1,075	2,220E-05	9,958E-06	0,02757	26501,10	2,445E-12	1,48E+08	9,07E+13	0,2844	0,1696	0,0068
6	328,15	0,14	300,37	301,35	291,45	1,075	2,220E-05	9,958E-06	0,02757	26501,10	2,445E-12	1,48E+08	9,07E+13	0,2844	0,1628	0,0108

3.1.5.4 Modelos de Regresión Desarrollados

A partir de los resultados se desarrollaron los siguientes modelos de regresión para tratar de representar la relación entre la velocidad de secado y diversos factores experimentales; a continuación se muestra una tabla resumen de los modelos obtenidos con su estructura:

Tabla 10. Modelos de Regresión Obtenidos

Modelo	Estructura	Comentarios
1	$\frac{dX}{dt} = 2268,05 - 2,72T_g(t) + 0,393MC_{-1}(t) + 0,008T_{vbs}(t) - 0,007T_{sat}(t) - 0,001(T_g(t) - T_{amb}(t)) - 0,032Rg - 247759,295c$	Las temperaturas vienen en centígrados, la humedad en fracción y Schmidt esta calculado con base al modelo de difusividad del agua en aire usando como medio la madera
2	$\frac{dX}{dt} = 0,038T_g(t) + 0,390MC_{-1}(t) + 0,010T_{vbs}(t) - 0,008T_{sat}(t) - 0,0003(T_g(t) - T_{amb}(t)) + 0,0002Rg - 1581,265c$	
3	$\frac{dX}{dt} = 0,0002T_g(t) + 0,367MC_{-1}(t) + 0,0015T_{vbs}(t) - 0,003T_{sat}(t) + 5,73 \times 10^{-8}(T_g(t) - T_{amb}(t)) - 1,31 \times 10^{-8}Rg - \frac{3,73 \times 10^{-8}}{Sc}$	
4	$\frac{dX}{dt} = 0,482T_g(t) + 0,385MC_{-1}(t) + 0,0104T_{vbs}(t) - 0,008T_{sat}(t) + 0,0052Rg - \frac{0,836}{Sc}$	
5	$\frac{dX}{dt} = 0,00033T_g(t) + 0,3743MC_{-1}(t) - 2,264 \times 10^{-6}Rg - \frac{3,371 \times 10^{-2}}{Sc}$	
6	$\frac{dX}{dt} = 0,0285 \left[\frac{T_g(t) - T_{vbs}(t)}{T_{sat}(t)} \right] + 0,3592MC_{-1}(t) + 0,0051Rg^{(1/2)} - 3,373Sc^{(1/2)}$	
7	$\frac{dX}{dt} = 0,0239 \left[\frac{T_g(t) - T_{vbs}(t)}{T_{sat}(t)} \right] + 0,3238MC_{-1}(t) - 0,0246Rg^{(1/2)} Sc^{(1/2)}$	
8	$\frac{dX}{dt} = 0,00169 \left[\frac{T_g(t) - T_{vbs}(t)}{T_{sat}(t)} \right] + 0,3613MC_{-1}(t) - 0,0025Rg^{(1/2)} Sc^{(1/2)}$	
9	$\frac{dX}{dt} = 0,1540 \left[\frac{T_g(t) - T_{vbs}(t)}{T_{sat}(t)} \right] + 0,37MC_{-1}(t) - 0,0027Rg^{(1/2)} Sc^{(1/2)}$	
10	$\frac{dX}{dt} = 1,965 \left[\frac{T_g(t) - T_{vbs}(t)}{T_{sat}(t)} \right]^2 + 0,371MC_{-1}(t) - 0,0022Rg^{(1/2)} Sc^{(1/2)}$	
11	$\frac{dX}{dt} = 0,4298 \left[\frac{T_g(t) - T_{sat}(t)}{T_g(t) - T_{vbs}(t)} \right]^{(1/4)} + 0,3663MC_{-1}(t) - 0,0163Rg^{(1/2)} Sc^{(1/2)}$	
12	$\frac{dX}{dt} = 0,4289 \left[\frac{T_g(t) - T_{sat}(t)}{T_g(t) - T_{vbs}(t)} \right]^{(1/4)} + 0,2394MC_{-1}(t) - 0,0177Rg^{(1/2)} Sc^{(1/2)}$	Las temperaturas vienen en centígrados, la humedad en fracción seca y Schmidt esta calculado con base al modelo de difusividad del agua en aire usando como medio la madera
13	$\frac{dX}{dt} = 0,2362K_{-1}(t) - 0,0743 \left[\frac{T_g(t) - T_{vbs}(t)}{T_g(t) - T_{sat}(t)} \right]^4 - 1,442 \times 10^{-16}Sh^2$	Las temperaturas vienen en Kelvin, la humedad en fracción seca y Sherwood esta calculado usando el modelo de difusividad de Lu y Siebenmorgen para la variedad Newbonnet
14	$\frac{dX}{dt} = 0,2361K_{-1}(t) - 0,0749 \left[\frac{T_g(t) - T_{vbs}(t)}{T_g(t) - T_{sat}(t)} \right]^4 - 1,556 \times 10^{-16}Sh^2$	Las temperaturas vienen en Kelvin, la humedad en fracción seca y Sherwood esta calculado usando el modelo de difusividad de Lu y Siebenmorgen para la variedad Lemont

Con el objetivo de evaluar la calidad de los modelos, a continuación se muestra un resumen de los estadígrafos de cada modelo que tiene como objetivo el de ayudar a brindar los criterios de evaluación de cada una de las ecuaciones experimentales obtenidas (Ver siguiente página):

Tabla 11. Estadígrafos Asociados a cada uno de las Ecuaciones Experimentales

Modelo	R ² adj	F Observado	Número de Coeficientes No Significativos	Independencia de Residuos		
				Shapiro Wilks	Coeficiente de Asimetría	Coeficiente de Curtosis
1	0,6177	13,92	7	0,2531	0,65	0,23
2	0,8073	39,19	6	0,2317	0,75	-0,04
3	0,7966	36,48	6	0,0904	0,95	-0,08
4	0,8094	46,09	5	0,1779	0,84	-0,16
5	0,7979	63,17	2	0,0296	1,39	0,24
6	0,8075	67,39	3	0,1060	0,94	-0,18
7	0,8264	101,38	0	0,0187	1,89	0,41
8	0,8089	90,16	0	0,0730	1,09	-0,06
9	0,8013	85,60	1	0,0348	1,39	0,18
10	0,8022	86,14	1	0,0286	1,38	0,14
11	0,8080	89,62	0	0,0740	1,17	0,01
12	0,8125	92,49	0	0,0749	1,21	0,22
13	0,8043	87,37	0	0,0319	1,41	0,48
14	0,8043	87,37	0	0,0320	1,41	0,48

Para evaluar los modelos, el primer criterio que se uso fue el de eliminar a los modelos que tuviesen al menos un coeficiente no significativo. Después de esto se eliminaron aquellos modelos cuyo estadígrafo de Shapiro Wilks fuese inferior al $\alpha/2$ (0,025). Después de esto quedaron los siguientes modelos:

- Modelo 8
- Modelo 11
- Modelo 12
- Modelo 13
- Modelo 14

Para escoger el modelo de trabajo se evaluó la estructura de los mismos, donde se dieron los siguientes descartes:

- **Modelo 8:** Se descartó debido a que expresar la temperatura en grados Celsius podría causar un valor indeterminado en el modelo ya que en algunos casos se puede dar la situación de tener la temperatura de saturación del sistema en 0°C
- **Modelo 11:** Se descartó debido a que usaba la humedad en base húmeda, lo cual le restaba algo de congruencia a las unidades del modelo.
- **Modelo 12:** Se descartó debido a que no usaba por completo el Número de Sherwood, solo una fracción, por lo tanto no se puede afirmar que represente de manera completa el fenómeno de transferencia de masa.

En base a eso y debido a la similaridad estadística de los modelos 13 y 14, se va a evaluar más profundamente cada uno de ellos.

3.1.5.4.1 Análisis Estadístico del Modelo 14

Se hizo un análisis de regresión para determinar la relación entre la velocidad de remoción (dX/dt) y la Humedad del Grano en el momento inmediatamente anterior (X), el número térmico planteado (Nt) y el número de Sherwood del proceso. Para esto se usó la herramienta de análisis de Microsoft Excel 2010™, con los siguientes resultados:

Tabla 12. Estadígrafos de la Regresión para el Modelo 14.

Estadígrafo	Valor
Coeficiente de correlación múltiple	0,91058913
Coeficiente de determinación R^2	0,829172563
R^2 ajustado	0,804327103
Error típico	0,010971922
Observaciones	57

De la tabla 11, se puede destacar que los coeficientes de correlación (Múltiple, de Determinación y Ajustado), muestran un alto nivel de correlación entre la variable objetivo (dX/dt) y los factores experimentales (X , Nt y Sh); por lo tanto se va a procedió a realizar un análisis de varianza para la regresión con los siguientes resultados:

Tabla 13. Análisis de Varianza de la Regresión del Modelo 14.

Fuente de Variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	F Tabulado (Alpha = 0,05)
Regresión	3	0,031553426	0,010517809	87,37	2,8
Residuos	54	0,006500686	0,000120383		
Total	57	0,038054112			

De la tabla 12, también se puede inferir que la regresión muestra tendencia significativa, es decir, los factores experimentales tienen un efecto apreciable en el comportamiento de la variable objetivo. Después de comprobar esto, se procedió a aplicar una prueba T a cada uno de los componentes del modelo de regresión obtenido:

Tabla 14. Prueba t para los Componentes de la Regresión del Modelo 14

Componente del Modelo	Coefficiente	Error Típico	t Calculado	Valor P	T Tabulado Inferior (Alpha=0,025)	T Tabulado Superior (Alpha=0,025)
Sh ³	-1,556E-16	5,924-17	-2,626	0,0112	-2,006	2,006
(Nt ⁴)	-0,0749	0,028	-2,691	0,009		
X	0,2361	0,025	9,414	5,54E-13		

3.1.5.4.2 Análisis Estadístico del Modelo 13.

Se repitió el análisis realizado para el modelo 14 con los siguientes resultados:

Tabla 15. Estadígrafos de la Regresión para el Modelo 13.

Estadígrafo	Valor
Coeficiente de correlación múltiple	0,91058898
Coeficiente de determinación R ²	0,8291723
R ² ajustado	0,80432683
Error típico	0,01097193
Observaciones	57

Al igual que para el caso del modelo 14, los estadígrafos muestran un alto nivel de correlación entre la variable objetivo (dX/dt) y los factores experimentales (X, Nt y Sh).

Tabla 16. Análisis de Varianza de la Regresión del Modelo 13.

Fuente de Variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	F Tabulado (Alpha = 0,05)
Regresión	3	0,03155342	0,01051781	87,37	2,8
Residuos	54	0,0065007	0,00012038		
Total	57	0,03805411			

La tabla 16 confirma el nivel de significancia de la regresión.

Tabla 17. Prueba t para los Componentes de la Regresión del Modelo 13

Componente del Modelo	Coeficiente	Error Típico	t Calculado	Valor P	T Tabulado Inferior (Alpha=0,025)	T Tabulado Superior (Alpha=0,025)
Sh ³	-1,441E-16	5,489-17	-2,626	0,0112	-2,006	2,006
(Nt ⁴)	-0,0743	0,028	-2,654	0,0104		
X	0,2362	0,025	9,415	5,52E-13		

De las tablas 12 a 17 se puede afirmar que ambos modelos tienen un comportamiento estadístico muy similar, lo cual habilita a cualquiera de los dos para completar el sistema dinámico del proceso.

3.1.5.5 Validación de las Ecuaciones Obtenidas

Se va a validar el modelo 14 en dos fases, la primera se realizara prediciendo los datos que sirvieron para la construcción del modelo (Datos de Diseño); y la segunda con datos obtenidos en operación del equipo en otras condiciones geográficas (Datos de Prueba), estos resultados se muestran a continuación (Ver siguiente página):

Figura 17. Curvas de Secado para el Lote de Diseño No. 1

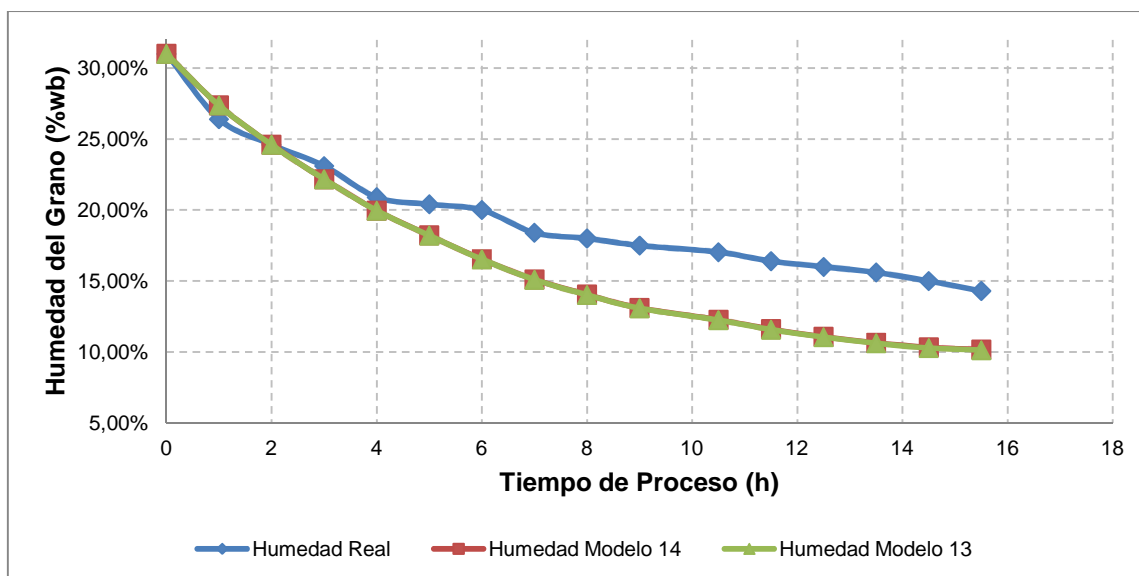


Figura 18. Curvas de Secado para el Lote de Diseño No. 2

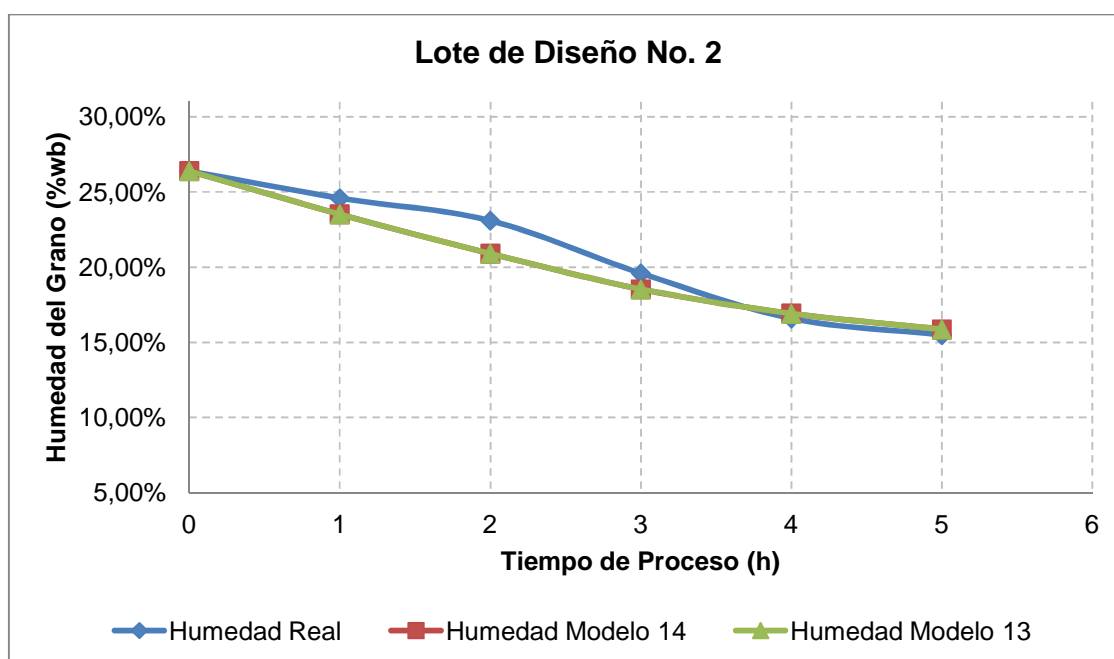


Figura 19. Curvas de Secado para el Lote de Diseño No. 3

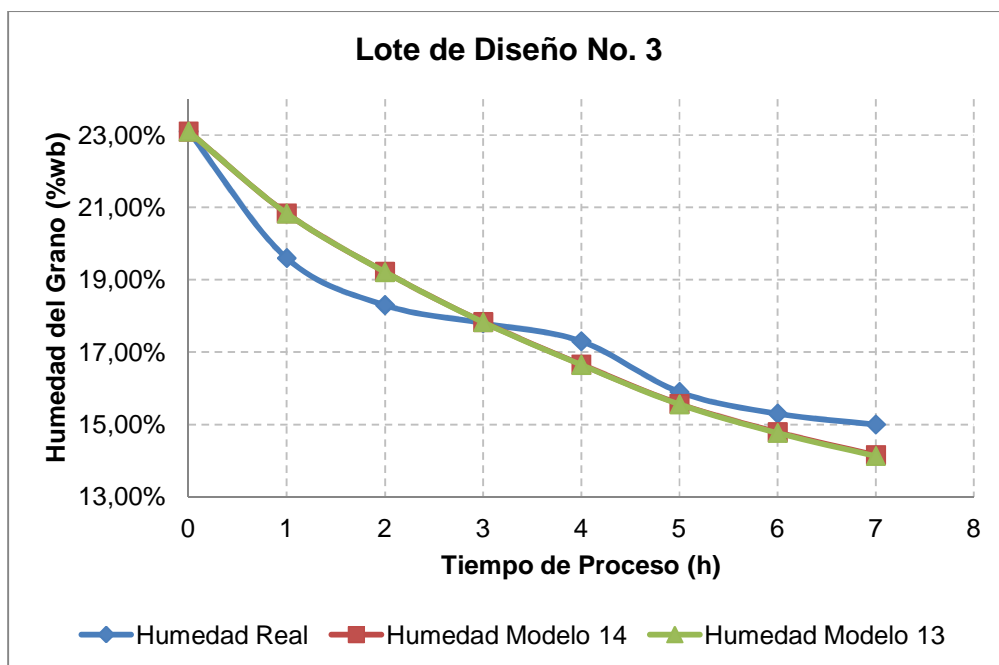


Figura 20. Curvas de Secado para el Lote de Diseño No. 4

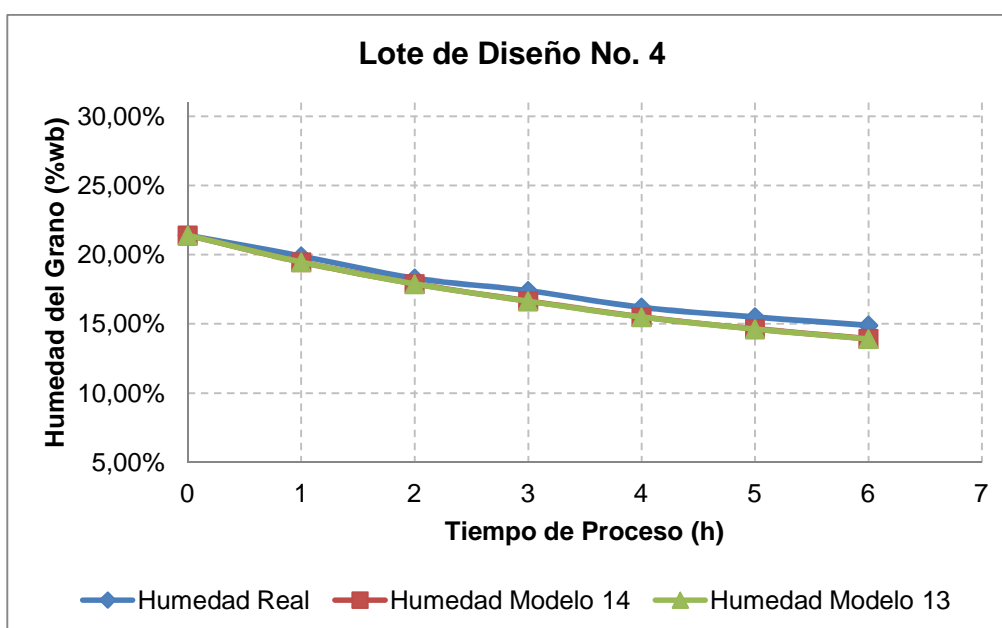


Figura 21. Curvas de Secado para el Lote de Diseño No. 5

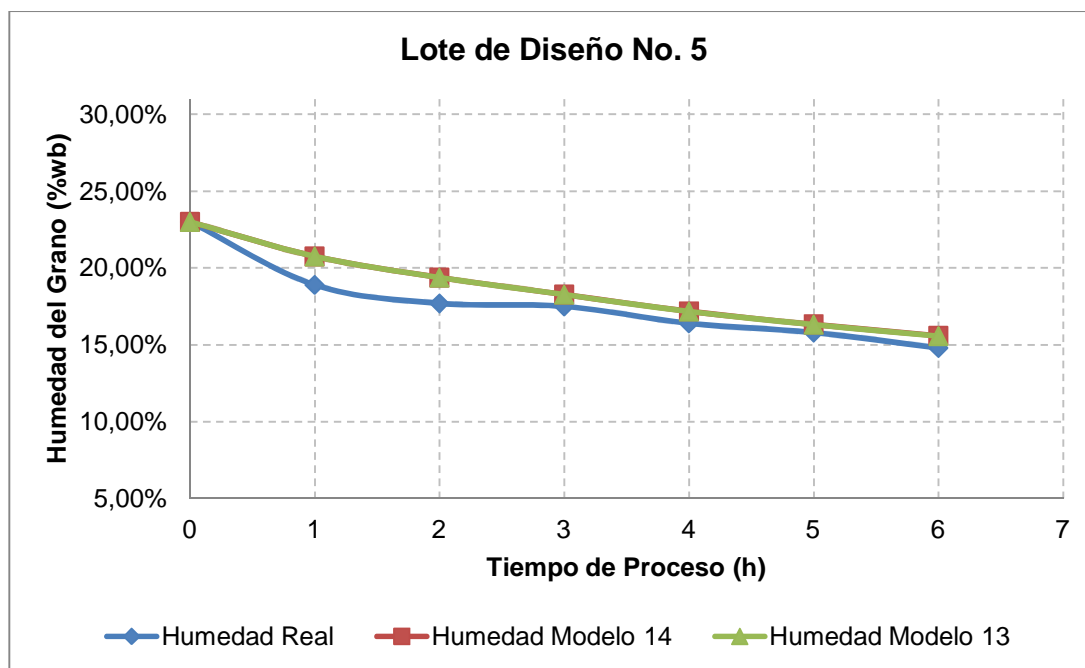


Figura 22. Curvas de Secado para el Lote de Diseño No. 6

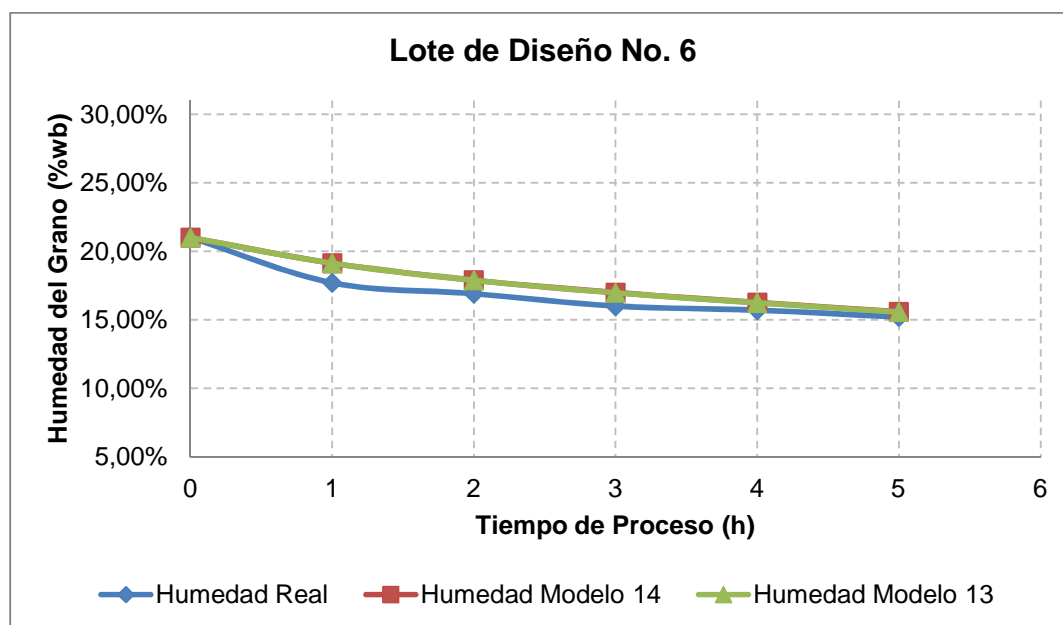
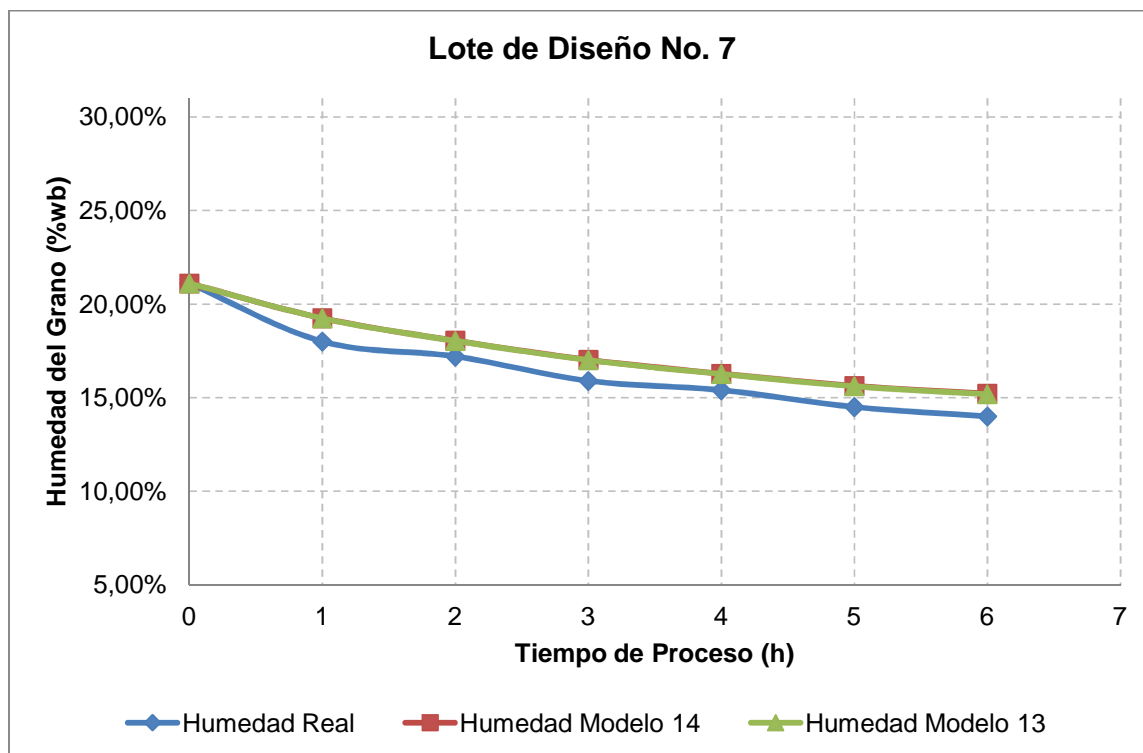


Figura 23. Curvas de Secado para el Lote de Diseño No. 7



Se puede apreciar que para todos los casos (Exceptuando el lote 1) se logró una predicción con una diferencia no mayor al 1% en términos de la humedad final, lo cual es una prueba bastante clara de la confiabilidad en la predicción realizada.

A continuación se presentan los datos de campo tomados en una experiencia de planta bajo condiciones ambientales y geográficas diferentes a las iniciales (Sabana Amazónica –Límite entre Guyana y Brasil), y bajo las cuales se realizó la predicción con el fin de determinar si los modelos hallados no estaban limitados a la zona de influencia de los datos de construcción (Ver siguiente página):

Tabla 18. Datos de Campo de Secado con la Secadora ST-40AX en la zona de Rupununi en Guyana – Junio de 2013

Tiempo (h)	T (K)	MC (%)	Tamb (K)	RH(%)	w	Twb secado (K)	Tsat (K)	paire (Kg/m3) secado	paire (Kg/m3) ambiente	μ aire (Pa*s)	μ agua (Pa*s)	Densidad Agua (Kg/m3)
0	318,15	27,36%	302,04	70,00%	0,017809	301,45	296,05	1,109	1,168	0,0000218	9,96E-06	0,0277
1	317,15	25,60%	300,37	84,00%	0,019439	302,05	297,45	1,112	1,174	2,176E-05	9,98E-06	0,0286
2	314,15	22,50%	300,37	84,00%	0,019439	301,45	297,45	1,123	1,174	2,164E-05	9,96E-06	0,0277
3	313,15	18,90%	300,37	84,00%	0,019439	301,25	297,45	1,126	1,174	0,0000216	9,96E-06	0,0274
4	313,15	18,40%	299,26	89,00%	0,019289	301,15	297,35	1,126	1,179	0,0000216	9,95E-06	0,0273
5	316,15	20,10%	299,26	89,00%	0,019289	301,85	297,35	1,116	1,179	2,172E-05	9,97E-06	0,0283
6	317,15	19,30%	299,26	89,00%	0,019289	302,05	297,35	1,112	1,179	2,176E-05	9,98E-06	0,0286
7	318,15	14,60%	299,26	89,00%	0,019289	302,25	297,35	1,109	1,179	0,0000218	9,98E-06	0,029
8	318,15	16,45%	298,15	94,00%	0,019067	302,15	297,15	1,109	1,183	0,0000218	9,98E-06	0,0288
9	315,15	14,05%	298,15	94,00%	0,019067	301,45	297,15	1,119	1,183	2,168E-05	9,96E-06	0,0277
10	318,15	13,65%	297,04	100,00%	0,018977	302,05	297,05	1,109	1,187	0,0000218	9,98E-06	0,0286
0	326,15	29,17%	304,26	59,00%	0,017030	302,75	295,35	1,081	1,159	2,212E-05	1,00E-05	0,0298
1	323,15	26,70%	303,15	66,00%	0,017904	302,55	296,15	1,091	1,163	0,000022	9,99E-06	0,0294
2	321,15	24,20%	305,37	59,00%	0,018168	302,35	296,35	1,098	1,155	2,192E-05	9,99E-06	0,0291
3	325,15	20,80%	305,37	56,00%	0,017219	302,65	295,45	1,085	1,155	2,208E-05	1,00E-05	0,0296
4	323,15	20,50%	305,37	56,00%	0,017219	302,25	295,45	1,091	1,155	0,000022	9,98E-06	0,029
5	322,15	20,40%	304,26	63,00%	0,018218	302,55	296,35	1,095	1,159	2,196E-05	9,99E-06	0,0294
6	316,15	21,50%	303,15	66,00%	0,017904	301,05	296,15	1,116	1,163	2,172E-05	9,95E-06	0,0271
7	310,15	17,10%	302,04	70,00%	0,017809	299,65	296,05	1,137	1,168	2,148E-05	9,91E-06	0,0251
8	321,15	17,50%	302,04	70,00%	0,017809	302,15	296,05	1,098	1,168	2,192E-05	9,98E-06	0,0288
9	326,15	17,10%	300,93	79,00%	0,018874	303,65	296,95	1,081	1,172	2,212E-05	1,00E-05	0,0312
10	327,15	15,30%	300,37	84,00%	0,019439	304,15	297,45	1,078	1,174	2,216E-05	1,00E-05	0,0321
11	316,15	13,70%	300,37	84,00%	0,019439	301,85	297,45	1,116	1,174	2,172E-05	9,97E-06	0,0283
12	320,15	13,80%	299,26	84,00%	0,018174	302,05	296,35	1,102	1,179	2,188E-05	9,98E-06	0,0286
13	318,15	13,30%	299,26	84,00%	0,018174	301,65	296,35	1,109	1,179	0,0000218	9,97E-06	0,028
0	319,15	26,73%	298,15	89,00%	0,018023	301,85	296,25	1,105	1,183	2,184E-05	9,97E-06	0,0283
1	326,15	23,00%	298,15	89,00%	0,018023	303,25	296,25	1,081	1,183	2,212E-05	1,00E-05	0,0306
2	330,15	22,10%	299,261	84,00%	0,018174	304,15	296,35	1,068	1,179	2,228E-05	1,00E-05	0,0321
3	325,15	20,40%	300,928	74,00%	0,017646	302,85	295,85	1,085	1,172	2,208E-05	1,00E-05	0,0299
4	318,15	18,50%	302,039	70,00%	0,017809	301,45	296,05	1,109	1,168	0,0000218	9,96E-06	0,0277
5	319,15	16,30%	303,15	66,00%	0,017904	301,75	296,15	1,105	1,163	2,184E-05	9,97E-06	0,0282
6	320,15	16,10%	304,261	63,00%	0,018218	302,15	296,35	1,102	1,159	2,188E-05	9,98E-06	0,0288
7	321,15	14,60%	304,261	63,00%	0,018218	302,35	296,35	1,098	1,159	2,192E-05	9,99E-06	0,0291
8	328,15	13,90%	302,039	79,00%	0,020173	304,65	298,05	1,075	1,168	0,0000222	1,01E-05	0,033
8,5	331,15	12,60%	303,15	76,00%	0,020706	305,55	298,45	1,065	1,163	2,232E-05	1,01E-05	0,0346

Tabla 18. Continuación

Tiempo (h)	T (K)	MC (%)	Tamb (K)	RH(%)	w	Twb secado (K)	Tsat (K)	paire (Kg/m3) secado	paire (Kg/m3) ambiente	μ aire (Pa*s)	μ agua (Pa*s)	Densidad Agua (Kg/m3)
0	323,15	27,28%	300,928	79,00%	0,018874	303,05	296,95	1,091	1,172	0,000022	1,00E-05	0,0302
1	319,15	25,80%	300,372	84,00%	0,019439	302,55	297,45	1,105	1,174	2,184E-05	9,99E-06	0,0294
2	319,15	24,20%	299,261	89,00%	0,019289	302,45	297,35	1,105	1,179	2,184E-05	9,99E-06	0,0293
3	328,15	21,80%	299,261	89,00%	0,019289	304,25	297,35	1,075	1,179	0,0000222	9,99E-06	0,0293
4	316,15	21,20%	299,261	84,00%	0,018174	301,25	296,35	1,116	1,179	2,172E-05	9,96E-06	0,0274
5	317,15	19,60%	299,261	89,00%	0,019289	302,05	297,35	1,112	1,179	2,176E-05	9,98E-06	0,0286
6	323,15	19,00%	299,261	89,00%	0,019289	303,25	297,35	1,091	1,179	0,000022	1,00E-05	0,0306
7	312,15	18,00%	299,261	89,00%	0,019289	300,95	297,35	1,130	1,179	2,156E-05	9,95E-06	0,027
8	314,15	16,70%	299,261	84,00%	0,018174	300,75	296,35	1,123	1,179	2,164E-05	9,94E-06	0,0267
9	328,15	15,80%	298,15	89,00%	0,018023	303,65	296,25	1,075	1,183	0,0000222	1,00E-05	0,0312
10	313,15	15,20%	297,039	94,00%	0,017806	300,35	296,05	1,126	1,187	0,0000216	9,93E-06	0,0261
11	326,15	14,90%	298,15	89,00%	0,018023	303,25	296,25	1,081	1,183	2,212E-05	1,00E-05	0,0306
12	325,15	12,40%	297,039	100,00%	0,018977	303,55	297,05	1,085	1,187	2,208E-05	1,00E-05	0,0311
0	323,15	26,60%	299,261	89,00%	0,019289	303,25	297,35	1,091	1,179	0,000022	1,00E-05	0,0306
1	319,15	23,20%	299,261	89,00%	0,019289	302,45	297,35	1,105	1,179	2,184E-05	9,99E-06	0,0293
2	319,15	20,80%	298,15	94,00%	0,019067	302,35	297,15	1,105	1,183	2,184E-05	9,99E-06	0,0291
3	328,15	20,40%	298,15	94,00%	0,019067	304,15	297,15	1,075	1,183	0,0000222	1,00E-05	0,0321
4	316,15	20,20%	298,15	94,00%	0,019067	301,65	297,15	1,116	1,183	2,172E-05	9,97E-06	0,028
5	317,15	18,10%	298,15	94,00%	0,019067	301,95	297,15	1,112	1,183	2,176E-05	9,98E-06	0,0285
6	323,15	17,00%	297,039	100,00%	0,018977	303,15	297,05	1,091	1,187	0,000022	1,00E-05	0,0304
7	312,15	15,50%	297,039	100,00%	0,018977	300,75	297,05	1,130	1,187	2,156E-05	9,94E-06	0,0267
8	314,15	15,00%	297,039	100,00%	0,018977	301,15	297,05	1,123	1,187	2,164E-05	9,95E-06	0,0273
9	328,15	14,70%	298,15	94,00%	0,019067	304,15	297,15	1,075	1,183	0,0000222	1,00E-05	0,0321
10	313,15	13,00%	299,261	89,00%	0,019289	301,15	297,35	1,126	1,179	0,0000216	9,95E-06	0,0273

A partir de los datos anteriores se construyeron las siguientes curvas de secado real y predichas (Ver siguiente página):

Figura 24. Curvas de Secado para el Lote de Campo No. 1

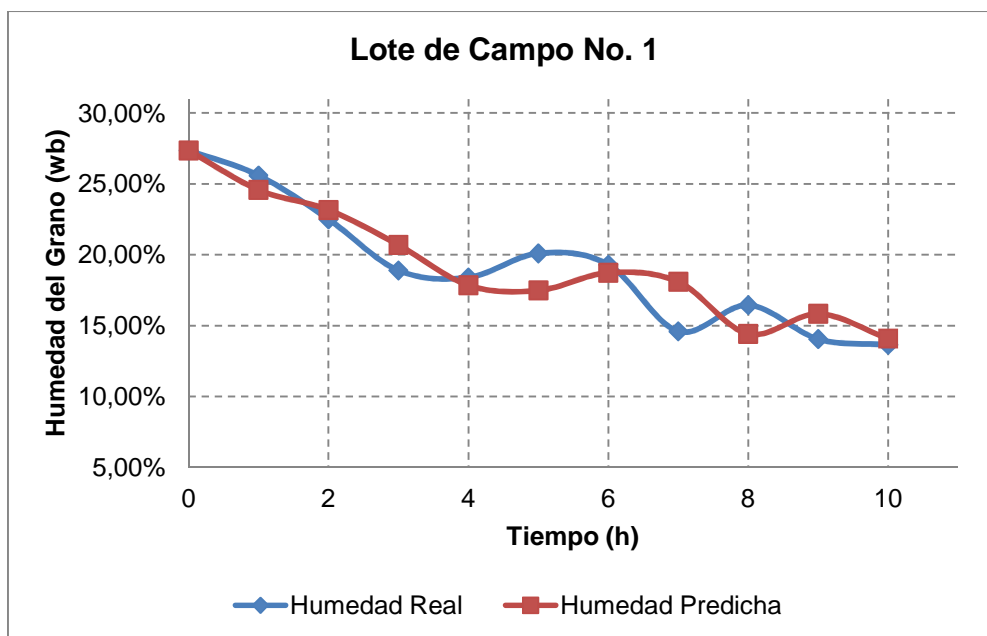


Figura 25. Curvas de Secado para el Lote de Campo No. 2

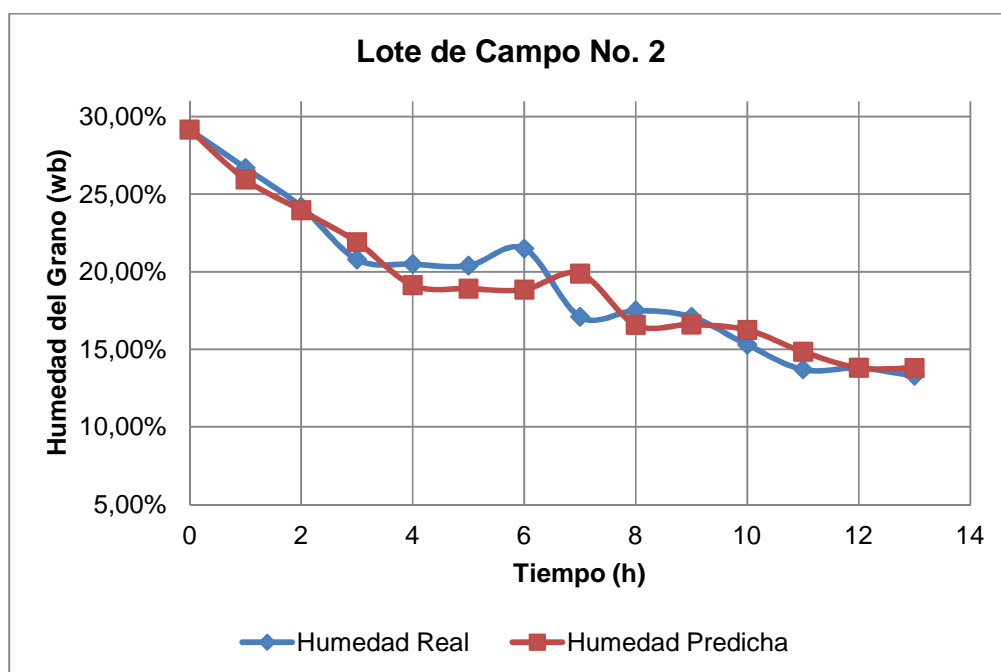


Figura 26. Curvas de Secado para el Lote de Campo No. 3

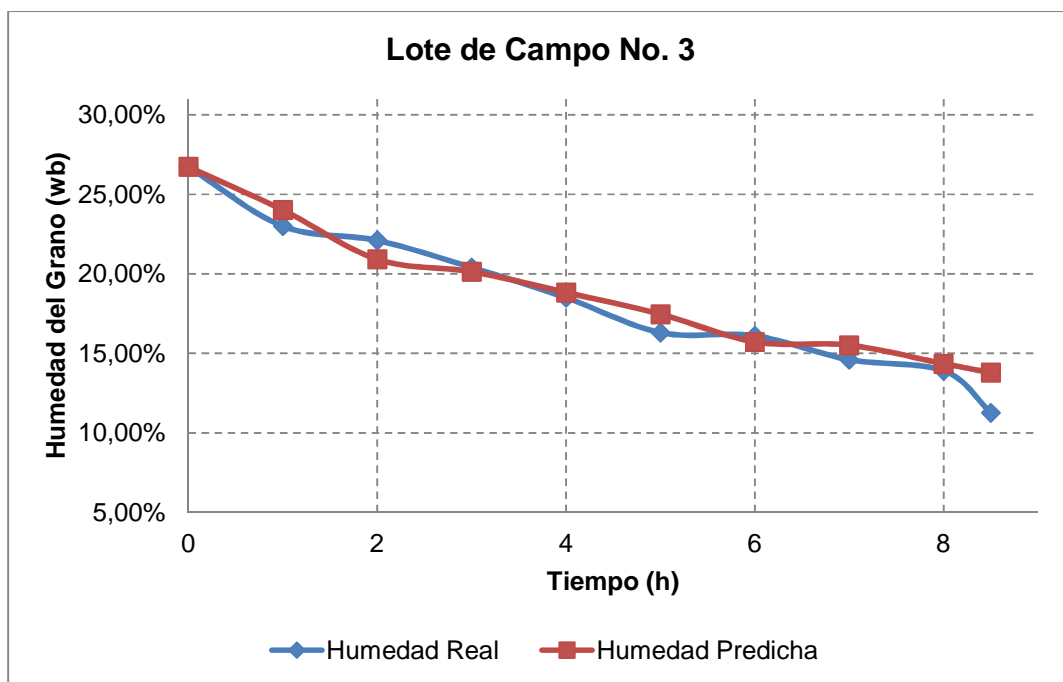


Figura 27. Curvas de Secado para el Lote de Campo No. 4

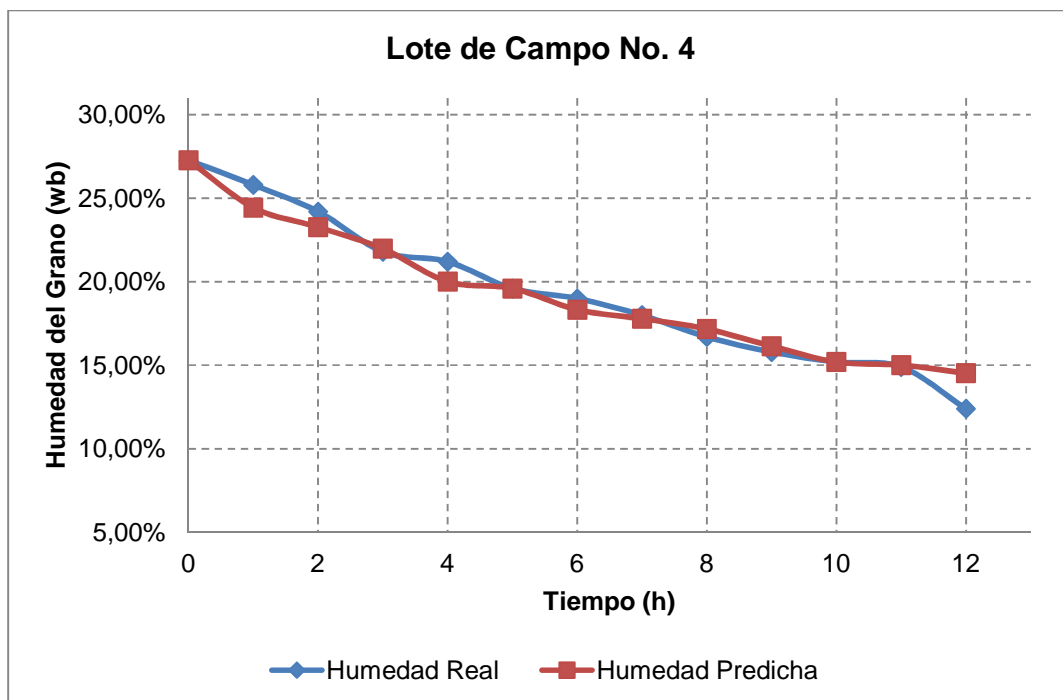
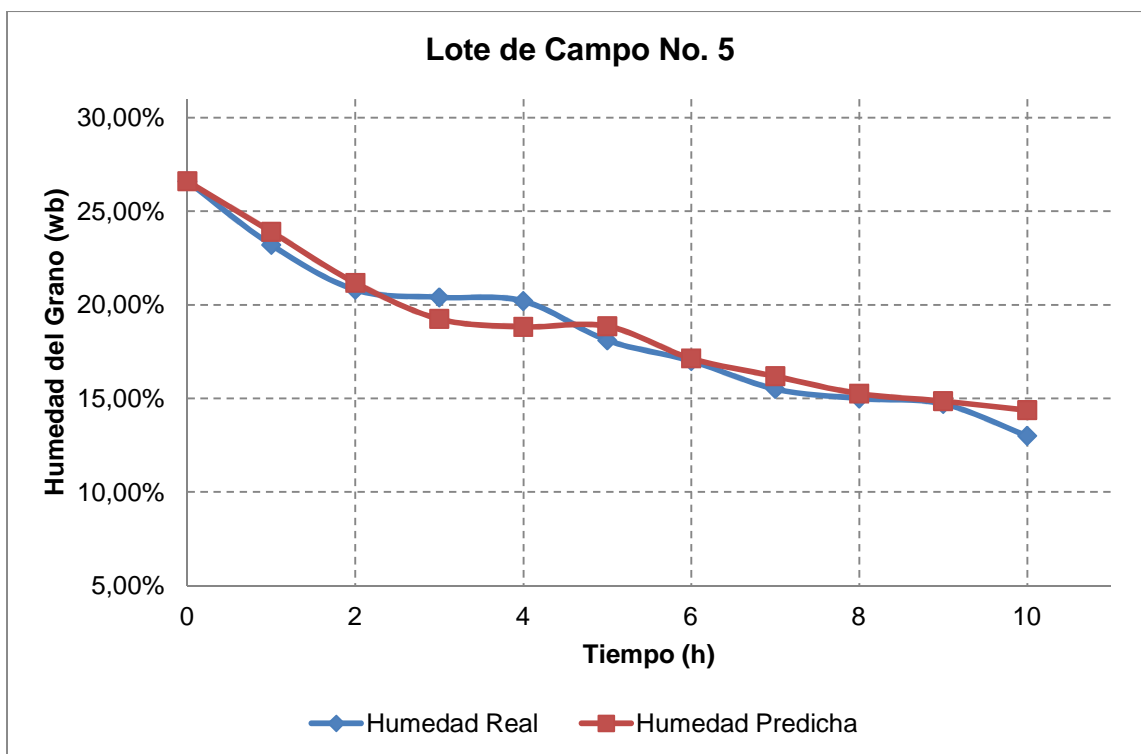


Figura 28. Curvas de Secado para el Lote de Campo No. 5



Se puede apreciar que en el escenario de trabajo, el modelo también fue bastante acertado en sus predicciones, lo cual valida su escogencia y proporciona las herramientas de juicio necesarias para poder concluir que el modelo de predicción es el adecuado.

CAPÍTULO 4. SIMULACIÓN DEL PROCESO Y DISEÑO DE LA ESTRATEGIA DE CONTROL

4.1 SIMULACIÓN DINÁMICA DEL PROCESO DE SECADO EN RECIRCULACIÓN DE ARROZ PADDY

Usando uno de los dos modelos experimentales obtenidos se pudo completar el sistema de ecuaciones propuesto en el capítulo 3. Lo anterior permitió el desarrollo de una herramienta de simulación del proceso de secado que mostrara la dinámica del mismo. En este capítulo se encontrarán una serie de casos estudio que permitirán determinar la dinámica real del proceso ante situaciones ideales y algunas situaciones de cambios ambientales que normalmente se dan en la vida real.

En el modelo dinámico se va a monitorear el comportamiento en el tiempo de proceso de las siguientes variables:

- Humedad del Grano (%)
- Merma Ocasionada por la Pérdida de Humedad (Kg)
- Velocidad de Secado (KgAgua/KgSH)
- N_t Predicho (Adimensional)
- Sherwood Predicho (Adimensional)

4.1.1 Simulación para condiciones ambientales típicas en un proceso a temperatura constante

Para este ejercicio se definen las siguientes condiciones ambientales como datos típicos de funcionamiento de los equipos de secado:

- Temperatura ambiente: 25°C
- Humedad relativa promedio: 75%
- Altitud: 0 msnm

A partir de las condiciones ambientales base, se va a realizar la simulación asumiendo que al proceso entrará grano con una humedad promedio del 24% y se comprará el desempeño de procesos a 50, 55 y 60°C. A continuación se

presentan las diferentes combinaciones de Temperatura de Secado, Temperatura de Evaporación del Agua (Bulbo Húmedo del Aire Caliente) y la Temperatura de Saturación del Ambiente.

Tabla 19. Escenarios de Simulación a Temperatura Constante y Condiciones de Típicas de Funcionamiento

Escenario	Temperatura de Secado (°C)	Temperatura de Saturación (°C)	Temperatura de Evaporación (°C)
1	50	20,3	28,1
2	55	20,3	29,2
3	60	20,3	30,2

Al simular los tres escenarios se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 20. Curvas de Secado Predichas con el Sistema Modelado

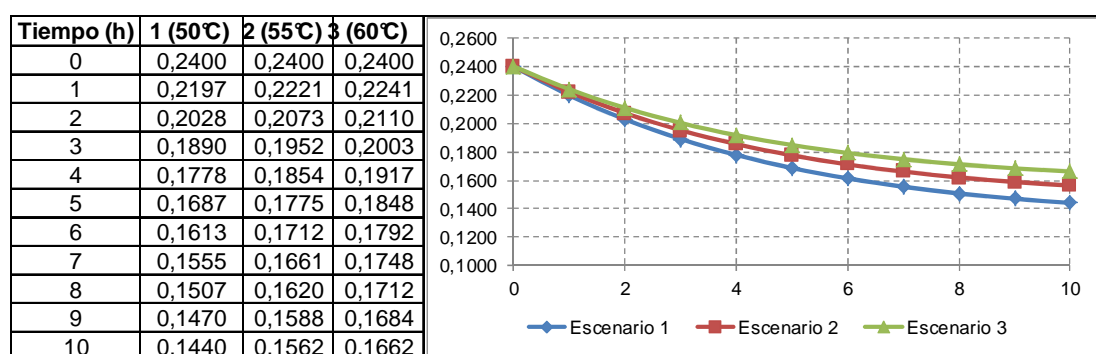


Tabla 21. Curvas de Velocidad de Secado Predichas con el Sistema Modelado

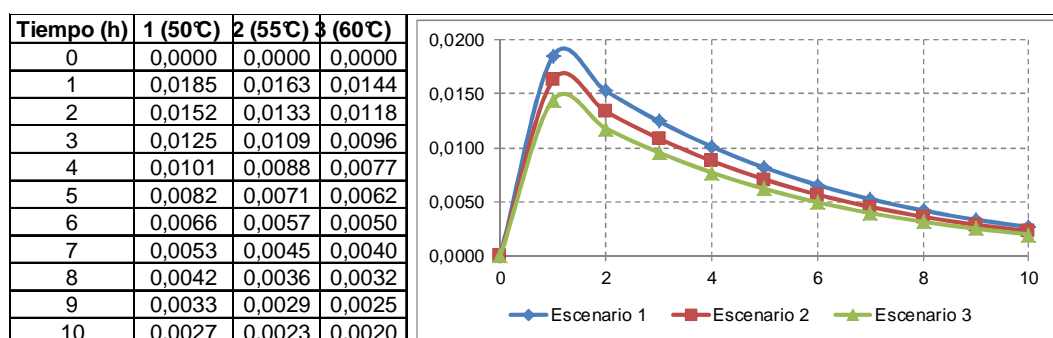


Tabla 22. Componentes de la ecuación experimental con el sistema modelado

Escenario	Nt	Sh
1 (50°C)	0,7374	44754,46
2 (55°C)	0,7752	44211,70
3 (60°C)	0,8035	43682,38

De las tablas 19 y 20 se puede decir que el escenario 1 proporcionó un mejor comportamiento de secado y de la tabla 21 se puede ver que dicho escenario correspondió con el menor Nt y el mayor Sh de los 3, lo cual es un indicio importante. Para continuar con el análisis se propone la realización de escenarios que muestren cambios en las condiciones ambientales que permitan evaluar que pasa ante cambios de Nt y Sh y que además proporcionarán la base para hallar el tratamiento óptimo esperado ante una situación real.

4.1.2 Simulación para condiciones ambientales variables en un proceso a temperatura constante

Para esto se van a mantener los escenarios de proceso descritos en el apartado 4.1.1 pero con la siguiente tabla de datos ambientales:

Tabla 23. Condiciones Ambientales Propuestas para el Caso Estudio del Apartado 4.1.2

Tiempo (h)	Tamb (°C)	RH (%)	Twb(°C)	Tsat (°C)
0	31,11	59,00%	29,6	22,2
1	30,00	66,00%	29,4	23
2	32,22	59,00%	29,2	23,2
3	32,22	56,00%	29,5	22,3
4	32,22	56,00%	29,1	22,3
5	31,11	63,00%	29,4	23,2
6	30,00	66,00%	27,9	23
7	28,89	70,00%	26,5	22,9
8	28,89	70,00%	29	22,9
9	27,78	79,00%	30,5	23,8
10	27,22	84,00%	31	24,3

Tabla 24. Curvas de Secado Predichas con el Sistema Modelado y Cambios en las Condiciones Ambientales

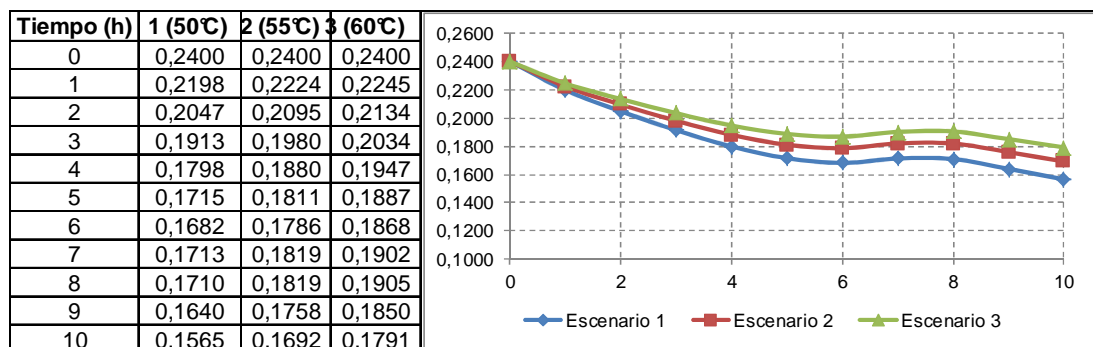


Tabla 25. Curvas de Velocidad de Secado Predichas con el Sistema Modelado y Cambios en las Condiciones Ambientales

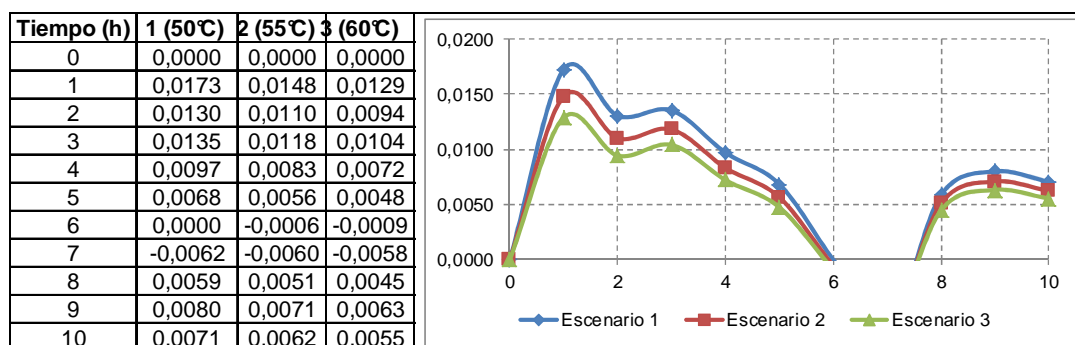


Tabla 26. Componentes de la ecuación experimental con el sistema modelado y Cambios en las Condiciones Ambientales

Tiempo (h)	Nt			Sh		
	1	2	3	1	2	3
0	0,7338	0,7744	0,8042	43282,27	42757,38	42245,46
1	0,7630	0,8000	0,8270	43474,9	42947,66	42433,47
2	0,7761	0,8113	0,8370	43668,64	43139,05	42622,57
3	0,7401	0,7798	0,8090	43378,45	42852,38	42339,33
4	0,7545	0,7920	0,8196	43765,93	43235,16	42717,53
5	0,7687	0,8050	0,8315	43474,9	42947,66	42433,47
6	0,8185	0,8469	0,8676	44955,63	44410,44	43878,73
7	0,8672	0,8879	0,9030	46397,15	45834,47	45285,71
8	0,7749	0,8100	0,8356	43863,5	43331,55	42812,76
9	0,7443	0,7853	0,8149	42429,04	41914,49	41412,67
10	0,7393	0,7818	0,8123	41964,45	41455,54	40959,21

De las tablas 23 a 25 se puede establecer que el tratamiento del escenario 1 es el más adecuado ya que a pesar de los cambios ambientales se mantiene la tendencia de minimizar el Nt y maximizar Sh.

4.1.3 Simulación para condiciones ambientales variables en un proceso a temperatura variable

El cambio constante en las condiciones ambientales obliga a hacer ajustes en la temperatura de trabajo para mantener en un rango óptimo la velocidad de remoción y por ende disminuir el tiempo de proceso. Para evaluar esto se va a simular el proceso bajo dos escenarios de temperatura variable, el primero se va a tomar de los datos experimentales, donde la variación se dio por la naturaleza de la combustión de biomasa (Heterogeneidad de combustible) y el segundo obedece al criterio tradicional de expertos en la operación. Los escenarios planteados son:

Tabla 27. Escenarios de Simulación a Temperatura y Condiciones Ambientales Variables

Periodo	Escenario 4 (°C)	Escenario 5 (°C)
0 a 3h	50,75	55
3 a 7h	44,75	50
7 a 10h	51,67	45

Los resultados del ejercicio se presentan a continuación:

Tabla 28. Curvas de Secado Predichas con el Sistema Modelado con Cambios en las Condiciones Ambientales y en la Temperatura del Proceso

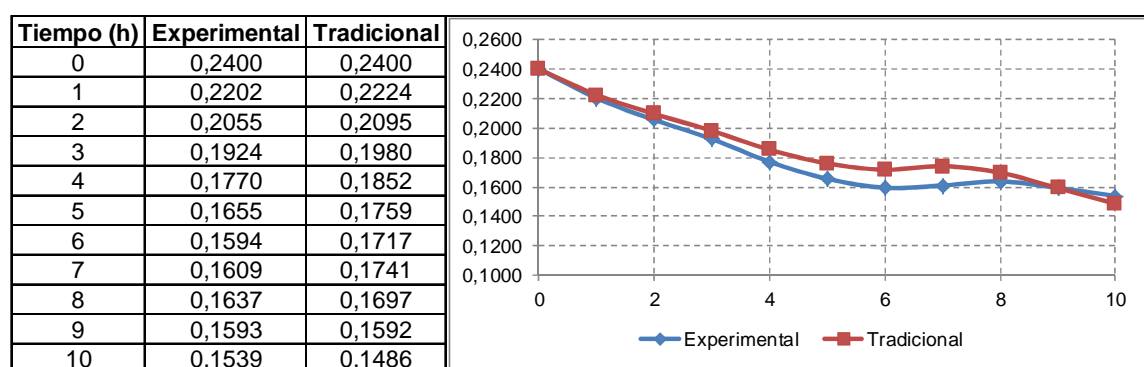


Tabla 29. Curvas de Velocidad de Secado Predichas con el Sistema Modelado con Cambios en las Condiciones Ambientales y en la Temperatura del Proceso

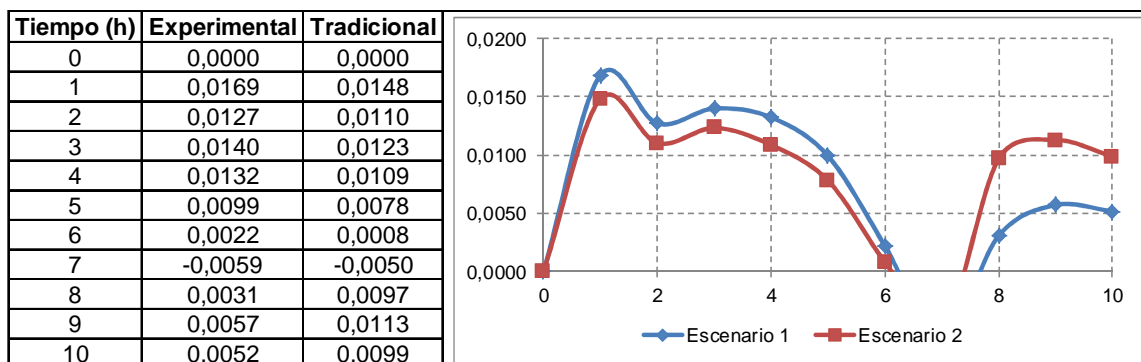


Tabla 30. Componentes de la ecuación experimental con el sistema modelado, Cambios en las Condiciones Ambientales y en la Temperatura de Proceso

Tiempo (h)	Nt		Sh	
	Experimental	Tradicional	Experimental	Tradicional
0	0,7408	0,7744	43202,69	42757,38
1	0,7694	0,8000	43394,96	42947,66
2	0,7822	0,8113	43588,34	43139,05
3	0,6793	0,7401	43945,39	43378,45
4	0,6971	0,7545	44337,93	43765,93
5	0,7123	0,7687	44043,10	43474,90
6	0,7747	0,8185	45543,18	44955,63
7	0,8749	0,8371	46207,63	46974,29
8	0,7880	0,7240	43684,33	44409,12
9	0,7596	0,6840	42255,74	42956,83
10	0,7552	0,6763	41793,04	42486,46

De las tablas 27 a 29 se puede concluir que el escenario tradicional es el que mejores prestaciones ofrece ya que minimiza el Nt cuando la humedad descende, es decir el modelo de variación tradicional garantiza que se acondiciona de mejor manera el aire cuando se tiene un menor potencial de liberación.

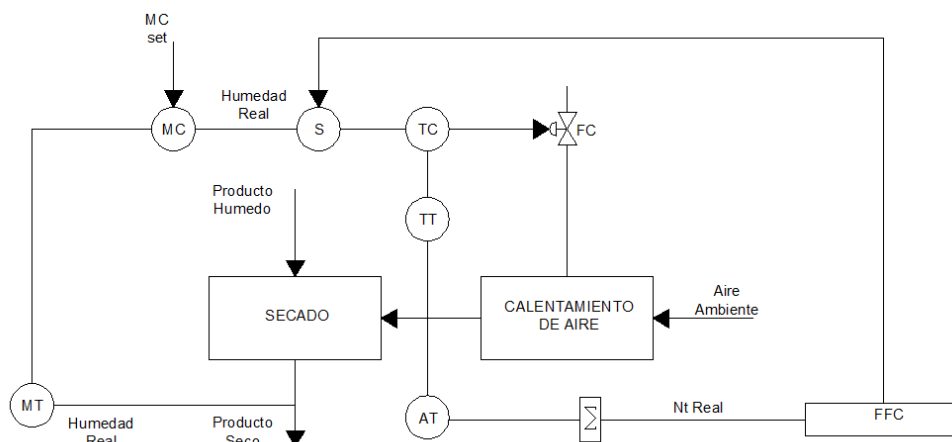
4.1.4 Trayectoria Óptima de Secado

La trayectoria óptima de la operación dependerá de las condiciones ambientales, por ejemplo con condiciones de confort constantes lo mejor para el sistema será trabajar a temperatura constante; pero a condiciones ambientales variables, se deberá aplicar un arreglo de cambio de temperaturas de mayor a menor a medida vendrá dada por las curvas de humedad y de velocidad de remoción obtenidas bajo el arreglo de temperaturas de variación tradicional bajo condiciones de confort. Esto implica que la trayectoria óptima va a variar en función de los diferentes escenarios que el ambiente pueda ofrecer.

4.2 DISEÑO DE LA ESTRATEGIA DE CONTROL

La estrategia de control de este proceso debe fundamentarse en el establecimiento de las condiciones ambientales sobre las que se va a llevar a cabo la predicción de base de trabajo; en base a esto, el sistema debería arrancar con una estimación bajo condiciones ambientales constante, y a medida que las condiciones ambientales cambien, se debe empezar a realizar un escenario de modificación de temperaturas de trabajo, con el fin de buscar la minimización de N_t , ya que después de los análisis del apartado 4.1 se puede afirmar que a menores valores de N_t se tienen mayores velocidades de secado. Para lograr lo anterior se ha propuesto la utilización de un control PID para el lazo humedad-temperatura y control FeedForward para buscar la optimización del N_t . A continuación se presenta la estrategia propuesta:

Figura 29. Estrategia de Control Propuesta



5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- Después de la realización de esta investigación, se puede afirmar que se desarrolló un modelo completo de predicción del comportamiento del proceso de secado a escala industrial, validado para dos tipos de condiciones atmosféricas y geográficas y también validado para diferentes tamaños de carga de proceso.
- Se desarrolló un nuevo valor numérico de control $-N_t$ basado en los gradientes térmicos del proceso de secado y que permite modelar y desempeñar de una manera más adecuada el proceso de secado a escala industrial, convirtiéndose en uno de los ejes centrales de la estrategia de control propuesta.
- Después de la realización de esta investigación se puede concluir que a escala industrial, se deben tener en cuenta más que el valor único de temperatura de secado otros factores y relaciones -Por ejemplo N_t y Sherwood- que describen de una mejor manera la dinámica del proceso y que a su vez pueden llegar a tener una injerencia más significativa sobre el proceso.
- Se puede concluir que para obtener una mayor velocidad de remoción en un proceso de secado de arroz paddy en batch, es muy importante minimizar la relación de gradientes térmicos del proceso, y esto no necesariamente implica elevar la temperatura de secado para buscar mayores remociones, sino que en algunos casos podría llegar a ser mejor incluso disminuir la magnitud del calentamiento siempre y cuando se logre una diferencia significativa entre la temperatura de evaporación del agua al interior del grano y la temperatura de saturación del aire ambiente
- Para los componentes del sector industrial, ya sean fabricantes o usuarios finales de las secadoras de torre, es muy importante el desarrollo de un modelo de predicción de secado que tenga la precisión y describa la dinámica del proceso tal como se logró en este trabajo, ya que gracias a él se puede optimizar el proceso de diseño de la operación y del equipo.

5.2 RECOMENDACIONES

- Se recomienda continuar en las investigaciones sobre la dinámica del secado industrial de granos, usando como punto de partida el sistema desarrollado en este trabajo, incluyendo sistemas complementarios a la operación tales como los equipos de generación de calor y dispositivos de alimentación y descarga para que el sistema de control además de tener influencia sobre la secadora, pueda gerenciar la gestión de toda la sección de remoción de humedad de una planta industrial.
- Se recomienda realizar este mismo proceso de análisis en la operación de secado con atemperamiento, que involucra la intermitencia de la exposición del grano al proceso de secado, cambiando la dinámica completa de la operación.
- Se recomienda continuar con las investigaciones en sistemas de control del proceso de secado usando como base la estrategia propuesta, con el objetivo de desarrollar un prototipo de sistema de control que pueda ser comercializable.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, J. R. Application of grain drying theory to the drying of maize and rice. Journal of Agricultural Engineering Research, 5, 363-385. 1960

CRANK, J. The mathematics of diffusion. Oxford University Press, Oxford, U.K. 1979

BHAGWATI Prakash and ZHONGLI Pan (2011) Modeling Moisture Movement in Rice, Advanced Topics in Mass Transfer, Prof. Mohamed El-Amin (Ed.), ISBN: 978-953-307-333-0, InTech, Available from: <http://www.intechopen.com/books/advanced-topics-in-mass-transfer/modelingmoisture-movement-in-rice>

GEANKOPLIS, Christie J. Transport Processes and Unit Operations. Boston: Allyn and Bacon, 1983

HENDERSON S. M. Progress in developing the thin layer drying equation. Transactions of the ASAE, 17, 1167-1168 & 1172. 1974

LU, R, SIEBENMORGEN, T.J. Moisture Diffusivity of Long-grain Rice Components. Transactions of the ASABE 35(6): 1955-1961. 1992

MONTGOMERY, Douglas C. Design and Analysis of Experiments Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2013

MUJUMDAR, Arun S. Handbook of Industrial Drying. Boca Raton, FL: CRC/Taylor & Francis, 2007.

STEFFE, J. F. SINGH, R. P. Diffusion coefficients for predicting rice drying behaviour. Journal of Agricultural Engineering Research, 27, 6, 489-493. 1982

TREYBAL, Robert Ewald. Mass-transfer Operations New York: McGraw-Hill, 1980

YANG, W.; JIA, C. C.; SIEBENMORGEN, T. J.; HOWELL, T. A. CNOSSEN, A. G. Intra-kernel moisture responses of rice to drying and tempering treatments by finite element simulation. Transactions of the ASAE, 45, 4, 1037-1044. 2002